

ESTRATÉGIAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUAS RESIDUAIS

EDUARDO FILIPE PIMENTEL RODRIGUES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

Coorientador: Engenheiro Pedro Leite Ferreira

FEVEREIRO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2015/2016 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais,

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe por provar o contrário.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

No final desta etapa importante na minha vida não poderia deixar de agradecer às pessoas que sempre me acompanharam e apoiaram neste longo e enriquecedor percurso.

Em primeiro lugar e porque representam as pessoas mais importantes e sem as quais provavelmente não teria conseguido chegar aqui, um agradecimento especial aos meus pais por todos os valores que me transmitiram e pelo apoio que sempre me deram. Ao meu pai pela humildade, confiança, carinho, compreensibilidade e honestidade que sempre me transmitiu. À minha mãe pelo exemplo de força, perseverança, superação que é para mim e por tal como o meu pai nunca me faltar com nada e estar sempre presente quando mais necessitei. Aos dois o meu mais sincero obrigado, é com orgulho que digo que sou o reflexo de ambos os dois.

Agradecer também ao meu orientador Professor Pacheco Figueiredo pela disponibilidade e amabilidade demonstradas, mas sobretudo pela ajuda fornecida ao longo desta dissertação. Ao Engenheiro Pedro Leite Ferreira, pelo tempo despendido, pelo apoio e suporte imprescindível na realização dos testes de eficiência à Estação Elevatória, bem com na respetiva análise. Uma palavra de gratidão à empresa H2OPT pelo provimento do material necessário à realização dos testes de eficiência. Um agradecimento também à Águas do Norte S.A., na pessoa do Professor Tentúgal Valente, pelo fornecimento de alguns dos dados necessários à elaboração desta dissertação.

Uma palavra também a todos os professores que se “atravessaram” no meu caminho ao longo destes anos de universidade, pela partilha de conhecimento e experiência, em especial a todos os que pertencem à secção de hidráulica. Foi um prazer apreender com vocês.

Deixar também um obrigado, à Dona Esmeralda e à Dona Paula, pela simpatia, boa disposição e disponibilidade prestados ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao Cristovão que já me acompanha há 10 anos, pelas palavras, paciência, apoio, sentido de humor contagiante e por todos os momentos bem passados que já vivemos juntos, um obrigado por tudo, na certeza que esta amizade será para o resto das nossas vidas. Agradecer também ao Filipe, ao Fábio, à Inês, ao Chico e a todos os outros amigos que me acompanharam ao longo destes últimos anos.

Ao Rui, o meu grande companheiro ao longo destes 6 anos de faculdade, obrigado pela companhia, pelas nossas grandes discussões de futebol e por ter sido uma das pessoas que fizeram estes anos parecer menos do que os realmente foram. Um obrigado também ao Brandão, por ter sido uma das pessoas com quem mais aprendi neste percurso, ao Jorge, ao Luís, ao Pedro e ao Veiga, todos vocês contribuíram de certa forma para o sucesso que alcancei.

Por último, mas não menos importante, agradecer a toda a turma de Hidráulica de 2014/2015, em especial ao Marcos, ao Caçador, à Célia, à Gisela, à Diana e ao Rúben, pela união, companheirismo, amizade e por todas as extraordinárias tardes passadas na “nossa” sala, um enorme obrigado a todos por estes dois últimos semestres inesquecíveis, tratou-se sem sombra de dúvidas do ano de faculdade que no futuro recordarei com mais saudade.

RESUMO

No paradigma atual, o dimensionamento de estações elevatórias de águas residuais está centrado na capacidade máxima de bombagem e nos custos iniciais, ignorando por completo o comportamento diário do sistema, bem como os custos associados à energia consumida. De facto, estes sistemas são caracterizados por variações de caudal afluente bastante significativas ao longo do dia, o que permitirá na fase de exploração adaptar o sistema às suas reais necessidades de bombeamento, promovendo assim reduções relevantes de custos com energia elétrica.

Nesse sentido e com as entidades gestoras cada vez mais sensíveis a esta temática, surgem os planos de otimização energética, com o objetivo de aumentar a eficiência energética, reduzindo assim os custos de energia a pagar pelas entidades responsáveis. No entanto cada estação elevatória tem as suas particularidades, tendo cada caso de ser estudado e analisado de forma a encontrar as melhores soluções de otimização. Assim podemos dividir estes POE em três fases: testes de eficiência, soluções de otimização e por fim a avaliação económica. Nos testes de eficiência é analisado o real funcionamento dos grupos eletrobomba, o que por diversas vezes e por variadas razões não corresponde à informação disponibilizada pelos fabricantes; segue-se a seleção de um conjunto de soluções adequadas aos problemas detetados durante os testes; por último a realização de uma comparação económica entre as soluções encontradas, por forma a selecionar a mais vantajosa na relação custo-benefício.

A presente dissertação começa por uma breve descrição sobre os sistemas elevatórios de águas residuais, caracterizando o seu funcionamento bem como todos os elementos constituintes destes. Segue-se uma apresentação do estado de arte do tema relativo à eficiência energética, abordando alguns dos assuntos mais importantes como os indicadores de eficiência energética existentes, custo do ciclo de vida de uma EE e os planos de otimização energética já acima referidos.

De seguida foi realizado um estudo à estação elevatória do Molhe Sul, integrada no Subsistema de Saneamento de Águas Residuais da ETAR do Ave, procurando avaliar o desempenho real dos grupos elevatórios, de forma a reduzir eventuais ineficiências e os custos de energia associados a estas. São apresentados os resultados obtidos pelos testes de eficiência realizados a 3 dos 4 grupos eletrobomba, assim como a sua respetiva análise, onde foi possível identificar um potencial máximo de poupança superior a 19000 €/ano.

Numa segunda fase, tendo como base as conclusões retiradas pelos testes de eficiência foram apontadas um conjunto de soluções passíveis de serem adotadas, com o intuito de diminuir os custos com energia elétrica, tendo sido feita uma avaliação da relação custo-benefício de algumas das soluções identificadas.

Por último foram efetuadas todas as conclusões ao trabalho realizado, bem como formuladas algumas propostas futuras, como por exemplo a simulação e avaliação de outras soluções de otimização, tendo em vista o refinar do plano de otimização energética efetuado para a estação elevatória estudada.

PALAVRAS-CHAVE: estações elevatórias, águas residuais, eficiência energética, grupos eletrobomba, planos de otimização energética.

ABSTRACT

Typically, the design of wastewater pumping stations is focused on the maximum pumping capacity and initial costs, ignoring the daily behaviour of the system and energy consumption costs. In fact, these systems are characterised by significant oscillations of influent flow throughout the day, which allows, in the exploration phase, an adjustment to the system's real pumping needs, promoting significant reductions in energy costs.

Therefore, with the management entities becoming increasingly sensible to this matter, energy optimization plans are being developed in order to increase energy efficiency. Every pumping station has its own particularities, so each case has to be studied individually, to find the best optimization solution. These energy optimization plans are divided into three phases: efficiency tests, optimization solutions and economic assessment. In the efficiency tests, the real operation of the pumps is studied, which in several occasions do not correspond to the manufacturers' information; then a set of solutions to the identified problems are selected; finally, there is an economic comparison between the solutions, selecting the most beneficial from a cost-effectiveness perspective.

This dissertation begins with a brief description of how wastewater pumping systems work as well as their elements. Then, the issue of energy efficiency is introduced, with the description of the energy efficiency indicators, pumping station life cycle cost and the aforementioned energy optimization plans.

The following chapter consists in the analysis performed to the Molhe Sul pumping system, which integrates the wastewater subsystem of the Ave WWTP. The aim of these analysis was to assess the real performance of the pumps in order to reduce possible inefficiencies and, consequently, their cost. The results and analysis of the efficiency tests performed on 3 of the 4 pumps are presented in this chapter. It is possible to identify potential savings of 19000 €/year, approximately.

In a second phase, and having the conclusions drawn from the efficiency test, a set of solutions were identified, with the intention of reducing energy costs. Cost-effectiveness analysis of some of the solutions were also carried out.

Lastly, all the conclusions that arise from this dissertation are exposed as well as some suggestions for future studies such as the simulation and evaluation of other optimization solutions, in order to refine the energy optimization plan of this pumping station.

Keywords: **pumping stations, wastewater, energy efficiency, pumping group, energy optimization plans**

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XV

INTRODUÇÃO 1

1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS	1

SISTEMAS ELEVATÓRIOS DE ÁGUAS RESIDUAIS 3

2.1. TIPOS DE GRUPOS ELEVATÓRIOS.....	3
2.1.1. EJETORES PNEUMÁTICOS.....	4
2.1.2. PARAFUSOS DE ARQUIMEDES.....	5
2.1.3. BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	6
2.2. CONSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA ELEVATÓRIO DE ÁGUAS RESIDUAIS.....	9
2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	9
2.2.2. CÂMARA DE CHEGADA	10
2.2.3. POÇO DE BOMBAGEM.....	11
2.2.4. CÂMARA DOS GRUPOS ELEVATÓRIOS	12
2.2.5. INTERFACE ESTAÇÃO ELEVATÓRIA – CONDUTA ELEVATÓRIA	12
2.2.6. CONDUTA ELEVATÓRIA	12
2.2.7. OUTRAS CONSIDERAÇÕES E ACESSÓRIOS	13
2.3. DIMENSIONAMENTO	16
2.3.1. CAUDAL AFLUENTE.....	16
2.3.1.1. CAUDAIS DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS	16
2.3.1.2. CAUDAIS DE ÁGUAS RESIDUAIS INDUSTRIAIS	17
2.3.1.3. CAUDAIS INFILTRADOS	17

2.3.2. CAUDAL A ELEVAR	17
2.3.3. CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO.....	18
2.3.4. CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA	19
2.3.5. POÇO DE BOMBAGEM.....	20

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA 23

3.1. ENQUADRAMENTO	23
3.2. INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	25
3.2.1. ENERGIA ESPECÍFICA (ES)	26
3.2.2. INDICADOR ERSAR	27
3.2.3. GREEN PUMP INDEX (GPX)	28
3.3. CUSTO DO CICLO DE VIDA.....	28
3.4. BEP- BEST EFFICIENCY POINT	30
3.5. SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA	31
3.5.1. ESCALONAMENTO DE BOMBAS EM PARALELO	32
3.5.2. BOMBAS DE PEQUENA CAPACIDADE (PONY PUMPS)	32
3.5.3. REDUÇÃO DO DIÂMETRO DO IMPULSOR.....	32
3.5.4. INSTALAÇÃO DE VARIADORES DE VELOCIDADE (VFD)	33
3.5.5. SUBSTITUIÇÃO POR BOMBAS MAIS EFICIENTES	34
3.6. PLANOS DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA (POE)	34
3.6.1. TESTES DE EFICIÊNCIA	35
3.6.2. SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO	36
3.6.3. AVALIAÇÃO ECONÓMICA.....	36

CASO DE ESTUDO. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA MOLHE SUL 37

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL.....	37
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELEVATÓRIO “MOLHE SUL”	39
4.2.1. POÇO DE BOMBAGEM.....	41
4.2.2. GRUPOS ELEVATÓRIOS	42
4.2.3. CONDUTA ELEVATÓRIA.....	47
4.3. TESTE DE EFICIÊNCIA.....	47

4.3.1. BREVE DESCRIÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL.....	47
4.3.1.1. ALTURA DE ELEVAÇÃO (H)	47
4.3.1.2. POTÊNCIA ABSORVIDA PELA BOMBA (P).....	48
4.3.1.3. EFICIÊNCIA DA BOMBA (H_H).....	48
4.3.2. PROCEDIMENTO DO TESTE	49
4.4. RESULTADOS DO TESTE DE EFICIÊNCIA	52
4.4.1. GRUPO Nº 1	53
4.4.2. GRUPO Nº 2	56
4.4.3. GRUPO Nº 4.....	59
4.4.4. GRUPOS Nº 2 E Nº 4	63
4.4.5. GRUPOS Nº1, Nº2 E Nº 4	65
4.4.6. CONCLUSÕES	67
4.5. CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO.....	69
4.5.1. DESNÍVEL GEOMÉTRICO.....	70
4.5.2. CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO APROXIMADA	70
4.5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
4.6. ANÁLISE DE EXISTÊNCIA DE CAVITAÇÃO.....	74

ESTAÇÃO ELEVATÓRIA MOLHE SUL. OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA.....79

5.1. INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	79
5.2. CUSTOS DEVIDOS A INEFICIÊNCIAS	81
5.3. ANÁLISE AOS CAUDAIS AFLUENTES	82
5.4. POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO	85
5.5. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO.....	85
5.5.1. REPARAÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DO IMPULSOR ATUAL (SOLUÇÃO 1).....	86
5.5.2. REPARAÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DO IMPULSOR ATUAL, AJUSTANDO VFD (SOLUÇÃO 2)	88
5.5.3. REDUÇÃO DO DIÂMETRO DO IMPULSOR SEM E COM AJUSTE DO VFD (SOLUÇÃO 3)	90
5.6. AVALIAÇÃO ECONÓMICA DAS SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO ESTUDADAS.....	96

CONCLUSÕES97

6.1. CONCLUSÕES SOBRE O CASO PRÁTICO ESTUDADO.....	97
---	-----------

6.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	98
BIBLIOGRAFIA	101
ANEXOS.....	103
ANEXO A – CAUDAIS BOMBADOS (ANO 2014)	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejetor Pneumático Shone (Fernandes, 2008).....	4
Figura 2: Funcionamento de um Ejetor Pneumático Shone (Fernandes, 2008). À esquerda, fase de enchimento, ao centro ejeter cheio, e à direita, fase de descarga.	4
Figura 3: Funcionamento Parafuso de Arquimedes [1].....	5
Figura 4: Parafusos de Arquimedes numa ETAR. (Tentúgal Valente, 2013).	6
Figura 5: Bomba centrífuga e respetivo esquema (Adapt. [2]).	6
Figura 6: EE com bomba e motor submersos (Tentúgal Valente, 2014).	7
Figura 7: EE com motor a seco e bomba submersa (Tentúgal Valente, 2014).	8
Figura 8: EE com bomba não submersível de eixo vertical (Tentúgal Valente, 2014).	8
Figura 9: EE com bomba não submersível de eixo horizontal (Tentúgal Valente, 2014).	8
Figura 10: Esquema dos tipos de bombas centrífugas.	9
Figura 11: Estação Elevatória (Tentúgal Valente, 2014).	10
Figura 12: Interface de ligação entre o coletor e o poço de bombagem (Tentúgal Valente, 2014).	11
Figura 13: Interface estação elevatória - conduta elevatória (Patto, 1990).	12
Figura 14: Correta entrada das águas no poço de bombagem (Patto, 1990).	14
Figura 15: Regulador de Nível (Tentúgal Valente, 2014).	15
Figura 16: Curva característica da instalação (CCI) (Grundfos, 2005).	18
Figura 17: Diagrama em mosaico, para seleção de bombas com velocidade de rotação de 1450 rpm (Ribeiro, 2014).	19
Figura 18: Ponto de funcionamento de uma bomba (Grundfos, 2005).	20
Figura 19: Consumo de energia a nível mundial (Grundfos, 2005).	24
Figura 20: Crescimento do custo da energia elétrica em Portugal [3].	24
Figura 21: Valores referência do Indicador ERSAR AR11 (ERSAR, 2014).	25
Figura 22: Distribuição geográfica da avaliação do indicador AR11 - Setor em alta (ERSAR, 2014).	25
Figura 23: Distribuição geográfica da avaliação do indicador AR11 - Setor em baixa (ERSAR, 2014).	26
Figura 24: Escala de classificação do índice GPX, de acordo com o desempenho real "C" e o que se poderá atingir potencialmente "P" (Vivas, 2014).	28
Figura 25: Principais custos no ciclo de vida de um sistema elevatório (Vivas, 2014).	30
Figura 26: Exemplo do BEP para uma determinada bomba (Leite, 2011).	30
Figura 27: Problemas devido a operações afastadas do BEP (Leite, 2015).	31
Figura 28: Efeito da redução do diâmetro do impulsor no ponto de funcionamento do sistema (Leite, 2010).	33
Figura 29: Efeito dos VFD nos grupos eletrobomba (Adapt. Leite, 2012).	33
Figura 30: Variação da energia específica em função da velocidade de rotação (Adapt. Leite, 2012).	34
Figura 31: Etapas de implementação dos POE.	35
Figura 32: Área geográfica dos municípios integrados no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais do Norte de Portugal (Adapt. [4]).	38
Figura 33: Vista aérea da zona abrangida pelo Subsistema de Saneamento da ETAR do Ave.	38
Figura 34: Estação Elevatória "Molhe Sul".	39
Figura 35: Câmara de chegada.	40
Figura 36: Sistema de gradagem.	40
Figura 37: Planta e identificação dos equipamentos da EE "Molhe Sul".	41
Figura 38: Poço de bombagem.	41
Figura 39: Grupos Elevatórios.	42

Figura 40: Variadores de frequência.	43
Figura 41: CCB ($H=f(Q)$) original do fabricante, 50 Hz.	44
Figura 42: CCB ($\eta=f(Q)$) original do fabricante, 50 Hz.	44
Figura 43: CCB ($Pot=f(Q)$) original do fabricante, 50 Hz.	45
Figura 44: CCB ($H=f(Q)$) original do fabricante, 43 Hz.	45
Figura 45: CCB ($\eta=f(Q)$) original do fabricante, 43 Hz.	46
Figura 46: CCB ($Pot=f(Q)$) original do fabricante, 43 Hz.	46
Figura 47 : Sensor de pressão na secção de aspiração.	49
Figura 48: Sensor de pressão na secção de compressão.	50
Figura 49: Analisador de energia.	50
Figura 50: Medidor de caudal.	51
Figura 51: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 1 (43 Hz).	54
Figura 52: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 1 (50 Hz).	55
Figura 53: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 2 (43 Hz).	57
Figura 54: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 2 (50 Hz).	58
Figura 55: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 4 (43 Hz).	61
Figura 56: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 4 (50 Hz).	62
Figura 57: Avaliação de resultados para funcionamento em paralelo dos grupos nº2 e nº4.	64
Figura 58: Avaliação de resultados para funcionamento em paralelo dos grupos nº1, nº2 e nº4.	66
Figura 59: Distinção das componentes responsáveis pela redução de eficiência em sistemas elevatórios (Vivas, 2016).	68
Figura 60: Registo da pressão na conduta de compressão, para aferição do desnível geométrico.	70
Figura 61: Variação das perdas de carga em função do caudal elevado.	72
Figura 62: Curva característica aproximada da instalação.	72
Figura 63: Intersecção da CCI com a CCB.	73
Figura 64: Valores de NPSHr em função do caudal.	75
Figura 65: Corte da câmara dos grupos elevatórios e identificação das alturas Z_1 e Z_D	75
Figura 66: Valor de caudal máximo para os valores mínimos de carga na aspiração.	77
Figura 67: Variação teórica do caudal afluente e caudal de projeto para uma bomba em funcionamento isolado.	83
Figura 68: Hidrograma teórico de caudais afluentes e capacidade média de elevação para uma bomba para o funcionamento atual.	84
Figura 69: Caudal bombeado por uma bomba com reparação/substituição do impulsor.	86
Figura 70: Capacidade de elevação de uma bomba para o cenário de reparação/substituição do impulsor, tendo em conta o hidrograma teórico de caudais afluentes.	87
Figura 71: Variação da Energia Especifica em função da frequência, para cenário de reparação/substituição dos impulsores.	89
Figura 72: CCB ($H=f(Q)$) para diâmetro do impulsor de 440 mm.	90
Figura 73: CCB ($P=f(Q)$) para diâmetro do impulsor de 440 mm.	91
Figura 74: CCB ($\eta=f(Q)$) para diâmetro do impulsor de 440 mm.	91
Figura 75: Caudal bombeado por uma bomba a 43 Hz com impulsor de 440 mm.	92
Figura 76: Caudal bombeado por uma bomba a 50 Hz com impulsor de 440 mm.	92
Figura 77: Variação da Energia Especifica em função da frequência, para cenário de redução do diâmetro do impulsor.	94
Figura 78: Capacidade de elevação de uma bomba para o cenário de redução do diâmetro do impulsor, tendo em conta o hidrograma teórico de caudais afluentes.	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Dispositivos de proteção.	11
Tabela 2: Capitações de consumo (Adapt. DR nº 23/95, 1995).	17
Tabela 3: Caudais Infiltrados (Adapt. DR nº 23/95, 1995).	17
Tabela 4: Procedimento do teste de eficiência.	51
Tabela 5: Perdas de carga contínuas e localizadas.	52
Tabela 6 : Características do BEP para a bomba AFP 3002 50 HZ (impulsor 467 mm).	52
Tabela 7: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº1 (43 Hz).	53
Tabela 8: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº1 (50 Hz).	53
Tabela 9: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº2 (43 Hz).	56
Tabela 10: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº2 (50 Hz).	56
Tabela 11: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº4 (43 Hz).	59
Tabela 12: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº4 (50 Hz).	60
Tabela 13: Registo da potência absorvida pelo grupo nº 4.	63
Tabela 14: Resultados do teste de eficiência para funcionamento em paralelo dos Grupos Nº2 e Nº4.	63
Tabela 15: Registo da potência absorvida pelo grupo nº 4.	65
Tabela 16: Resultados do teste de eficiência para funcionamento em paralelo dos Grupos Nº1, Nº2 e Nº4.	65
Tabela 17: Resultados globais dos ensaios realizados para o teste de eficiência pelo método convencional.	67
Tabela 18: Avaliação da redução de eficiência segundo as suas duas componentes.	69
Tabela 19: Pontos de funcionamento considerados para determinação da CCI.	71
Tabela 20: Avaliação dos valores de NPSHd e comparação com os valores de NPSHr + Margem.	76
Tabela 21: Gama de valores do Indicador ERSAR para avaliação da eficiência energética.	79
Tabela 22: Indicadores de eficiências para o funcionamento isolado dos grupos nº1, nº2 e nº4.	80
Tabela 23: Indicadores de eficiência energética para funcionamento simultâneo de 2 e 3 grupos eletrobomba.	81
Tabela 24: Poupanças potenciais máximas.	82
Tabela 25: Valores de Energia Específica para 1,2 e 3 bombas e respetivo funcionamento ao longo de um dia médio.	84
Tabela 26: Comparação do indicador Es, entre a situação atual e a solução de otimização de reparação/substituição do impulsor.	87
Tabela 27: Diferenças de consumo energia entre o cenário atual e uma possível reparação/substituição dos impulsores, tendo em atenção o funcionamento isolado ou em conjunto dos grupos eletrobomba.	88
Tabela 28: Ponto de funcionamento dos grupos elevatórios e Energia Específica em função da frequência para cenário de reparação/substituição do impulsor.	89
Tabela 29: Comparação do indicador Es, entre a situação atual e a solução de otimização de redução de diâmetro sem ajuste do VFD.	93
Tabela 30: Ponto de funcionamento dos grupos elevatórios e Energia Específica em função da frequência, para cenário de redução do diâmetro do impulsor.	94
Tabela 31: Diferenças de consumo energia entre o cenário atual e uma possível redução do diâmetro dos impulsores, tendo em atenção o funcionamento isolado ou em conjunto dos grupos eletrobomba.	95
Tabela 32: Avaliação económica das alternativas de otimização estudadas.	96

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ANSI – *American National Standards Institute*

BEP – *Best Efficiency Point*

CCB – Curva Característica da Bomba

CCI – Curva Característica da Instalação

CCV – Custo de Ciclo de Vida

Cap – Capitação

Cmda – Caudal Médio Diário Anual

DN – Diâmetro Nominal

DR – Decreto Regulamentar

EE – Estação Elevatória

EEAR – Estação Elevatória de Águas Residuais

Es – Energia Específica

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

F_{afluencia} – Fator de Afluência

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FFD – Ferro Fundido Dúctil

g – Aceleração da Gravidade

GPX – *Green Pump Index*

H – Altura de Elevação

H_{geo} – Altura Geométrica

HI – *Hydraulic Institute*

H_{man} – Altura Manométrica

ISO – *International Organization for Standardization*

NPSH – *Net Positive Suction Head*

P – Potência Absorvida pela Bomba

P_{atm} – Pressão Atmosférica

P_{gr} – Potência Absorvida pelo Motor Elétrico

POE – Plano de Otimização Energética

Pop – População

PorData – Base de Dados de Portugal Contemporâneo

P_u – Potência Hidráulica

P_v – Tensão de Vapor

Q - Caudal

$Q_{afl,total}$ – Caudal Afluente Total

$Q_{AR,dom}$ – Caudal de Águas Residuais Domésticas

$Q_{AR,ind}$ – Caudal de Águas Residuais Industriais

Q_{inf} – Caudal Infiltrado

RAC – Reservatório de Ar Comprimido

RASARP – Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal

VFD – *Variable Frequency Drive*

η_g – Eficiência Global

η_H – Eficiência da Bomba

η_M – Eficiência do Motor

ΔH – Perdas de Carga

ρ – Massa Volúmica

1

INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

A necessidade de utilização de sistemas elevatórios nas redes de drenagem de águas residuais é por vezes indispensável em virtude da orografia da área a drenar, cabendo ao projetista uma conceção e dimensionamento adequados, evitando assim deficientes funcionamentos e custos acrescidos dos mesmos. Porém, no cenário atual, o dimensionamento destes sistemas, devido às dificuldades de quantificação de caudais afluentes, está bastante centrado na capacidade máxima de bombagem e nos investimentos iniciais, ignorando que muitas das vezes os custos devido a consumos de energia representam a parcela mais significativa dos custos totais do ciclo de vida das estações elevatórias.

Assim devido à tendência crescente dos custos de energia em Portugal e com as Entidades Gestoras cada vez mais sensibilizadas no objetivo de garantir a máxima rendibilidade dos seus ativos, a eficiência energética acaba por ser, neste domínio, uma questão essencial em termos de sustentabilidade económica. Neste contexto, os sistemas elevatórios apresentam-se como uma excelente oportunidade de redução de custos de exploração devido ao limitado dimensionamento de que são alvo durante a fase de projeto.

Desta forma, e como as perdas de carga do sistema aumentam segundo uma relação de segundo grau com o caudal, uma operação acima das reais necessidades do mesmo, implica também um consumo desnecessário de energia. Como tal, uma análise focada no comportamento real e contínuo do sistema e de procura de soluções de otimização traduzir-se-á numa diminuição considerável de custos de operação.

Neste âmbito surgem os Planos de Otimização Energética que procuram encontrar a melhor solução de otimização por forma a garantir a máxima eficiência para cada sistema elevatório. Existem então diversas técnicas/soluções de otimização passíveis de serem implementadas sendo, no entanto, necessário realizar uma avaliação técnica do funcionamento hidráulico do sistema, procurando assim adaptar da melhor forma estas soluções às características específicas de cada estação elevatória.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Nesta dissertação pretende-se efetuar uma análise cuidada da problemática da eficiência energética em estações elevatórias de águas residuais sendo por isso essencial conhecer todas as variáveis e parâmetros que influenciam as diminuições de eficiência e consequente aumento dos custos de energia. É igualmente crucial conhecer o funcionamento deste tipo de sistemas bem como todas as técnicas existentes de otimização energética, para poder dar respostas à resolução destes problemas consoante cada caso.

De facto, os grupos eletrobomba, como componente central dos sistemas elevatórios, com o avançar do tempo e natural desgaste perdem eficiência, aumentando assim os custos de energia. No entanto estes problemas podem ser evitados ou minimizados se forem tomadas algumas medidas durante a fase de projeto ou mesmo na fase de exploração.

Assim neste trabalho procurar-se-á fazer uma breve revisão da literatura referente ao tema da eficiência energética, procurando desta forma dominar todas as vertentes relativas a este assunto com o intuito de aplicá-las a um caso prático.

Realizar-se-á um estudo à estação elevatória do Molhe Sul, situada na zona limítrofe entre Vila do Conde e a Póvoa de Varzim. Este estudo terá como objetivo avaliar o real desempenho dos grupos eletrobomba instalados, para posteriormente analisar o potencial de otimização existente neste sistema elevatório, com o propósito de apontar algumas soluções possíveis de minimização de eventuais ineficiências e consequente redução de custos devido a consumos energéticos.

Por último será efetuada uma análise económica comparativa entre a situação atual do sistema elevatório e os possíveis cenários expectáveis aplicando algumas dessas soluções de otimização, com o intuito de apurar a solução económica mais vantajosa.

2

SISTEMAS ELEVATÓRIOS DE ÁGUAS RESIDUAIS

As estações elevatórias de águas residuais são instalações que estão incorporadas nas redes de drenagem urbana que requerem uma atenção especial devido aos diversos problemas, quer de projeto, quer de manutenção e exploração que apresentam. Um desses problemas surge logo na fase de dimensionamento onde se torna, por vezes, bastante difícil selecionar os grupos elevatórios mais adequados, devido às constantes variações de caudal afluente ao longo do dia.

Assim neste capítulo apresentar-se-á primeiramente ao leitor uma descrição dos tipos de grupos elevatórios existentes, bem como uma breve noção sobre o seu funcionamento e características. As bombas centrífugas terão especial atenção pois são as mais frequentemente utilizadas hoje em dia em sistemas deste género.

De seguida serão descritos e caracterizados os principais elementos constituintes dos sistemas elevatórios e os quais garantem o correto funcionamento destes.

Por fim serão apresentados os principais parâmetros a considerar no dimensionamento atual de sistemas deste tipo, muito focado no caudal máximo de bombeamento, o que provocará custos energéticos bastante elevados, permitindo assim posteriormente na fase de exploração um aumento de eficiência/redução de custos através de uma otimização do binómio caudal afluente/caudal bombeado, tema que será abordado mais aprofundadamente nos capítulos seguintes.

2.1. TIPOS DE GRUPOS ELEVATÓRIOS

Os sistemas elevatórios equipados com bombas centrífugas serão os de estudo aprofundado neste trabalho. No entanto como componente fundamental de uma EEAR, é importante referir os outros tipos de grupos elevatórios existentes. Podem-se então dividir nos seguintes 3 grupos (Tentúgal Valente, 2014):

- Ejetores Pneumáticos;
- Parafusos de Arquimedes;
- Bombas Centrífugas.

2.1.1. EJETORES PNEUMÁTICOS

Os ejtores pneumáticos são adequados para situações em que o caudal a elevar é reduzido (na ordem dos 5 l/s no máximo) e as alturas de elevação também são diminutas (< 15 metros).

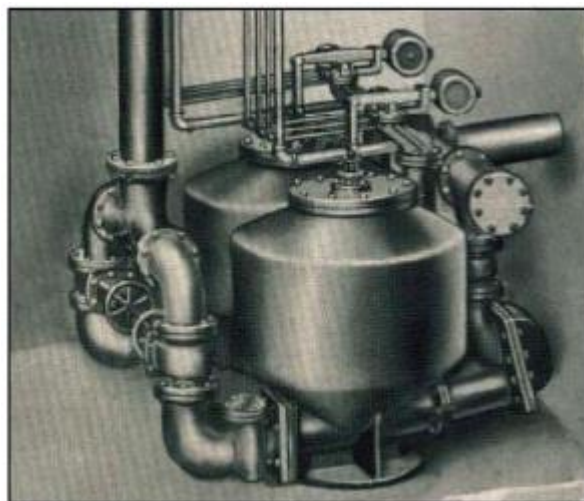


Figura 1: Ejtor Pneumático Shone (Fernandes, 2008).

Apesar destas condicionantes apresentam também algumas vantagens, tais como (Fernandes, 2008):

- São menos suscetíveis a entupimentos que as bombas centrífugas para caudais pequenos;
- A regularização é efetuada pelo próprio ejtor;
- Os problemas de cheiros são diminuídos, pois permitem o arejamento do esgoto, através do ar comprimido que é utilizado para o transporte das águas;
- São de fácil manutenção e garantem boas condições de higiene e segurança aos operadores.

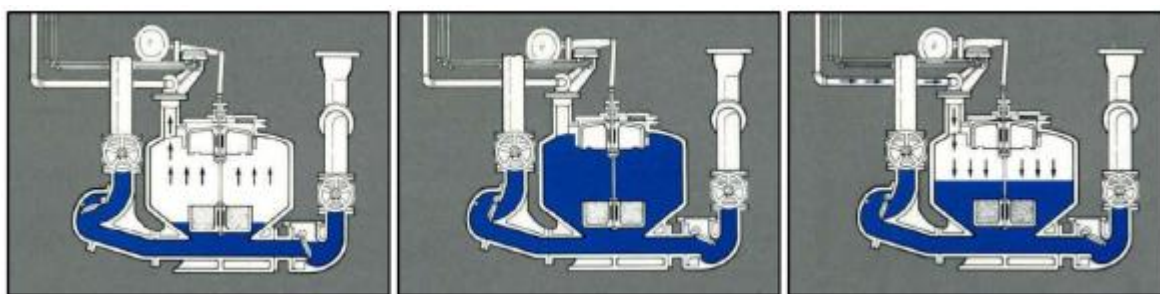


Figura 2: Funcionamento de um Ejtor Pneumático Shone (Fernandes, 2008). À esquerda, fase de enchimento, ao centro ejtor cheio, e à direita, fase de descarga.

Como desvantagens, além das já referidas restrições ao nível do caudal e alturas de elevação, apresentam-se as seguintes (Fernandes, 2008):

- Elevado custo e consumo de energia;

- Excessivo ruído de funcionamento;
- Baixo rendimento, quando comparado com outras soluções como as bombas centrífugas;
- Pouco atrativos sob o ponto de vista de mercado concorrencial.

Por estes motivos os ejetores são pouco utilizados como grupos elevatórios numa EEAR.

2.1.2. PARAFUSOS DE ARQUIMEDES

Inventado pelo matemático grego Arquimedes, este instrumento é um dos mais antigos ainda em utilização nos dias de hoje. Constituído por um cilindro a que está associado um varão ao centro em forma de espiral, este dispositivo funciona de forma simples, mas requer algum engenho. (Parafuso de Arquimedes – Infopedia, 2015)

“Para o seu funcionamento coloca-se a ponta do cilindro dentro de água e através do movimento rotacional do mesmo, a água que se encontra a um nível inferior é transportada para um nível superior.” (Parafuso de Arquimedes – Infopedia, 2015)



Figura 3: Funcionamento Parafuso de Arquimedes [1].

Ao contrário dos ejetores pneumáticos, os parafusos de Arquimedes são adaptáveis a qualquer gama de caudais afluentes, desde muito pequenos a muito elevados, sendo também instrumentos com rendimentos bastante elevados. Para além destas vantagens tratam-se de estruturas robustas de funcionamento contínuo sem qualquer tipo de tubos, logo não sujeitos a qualquer tipo de entupimento. (Tentúgal Valente, 2014).

No entanto a sua utilização está bastante condicionada pela altura de elevação que é capaz de vencer, normalmente não mais que 8 a 10 metros, e também pela distância que separa os pontos entre os quais esta se realiza. Os custos são extremamente elevados, não só do parafuso em si, como também a obra de construção que lhe está associada. (Tentúgal Valente, 2014).



Figura 4: Parafusos de Arquimedes numa ETAR. (Tentúgal Valente, 2014).

2.1.3. BOMBAS CENTRÍFUGAS

Existem três tipos de bombas que são geralmente utilizadas em sistemas elevatórios, as centrífugas/escoamento radial, as de escoamento axial e as de escoamento misto (Novais Barbosa, 1985 e Fernandes, 2008).

- Bombas centrífugas, ou de escoamento radial – O líquido entra axialmente pelo centro e sai radialmente pela periferia. A entrada do líquido pode ser apenas por um lado (aspiração simples) ou pelos dois lados (aspiração dupla). A pressão é gerada principalmente por meio da força centrífuga. Usualmente utilizadas para situações de grandes alturas de elevação e baixos caudais;

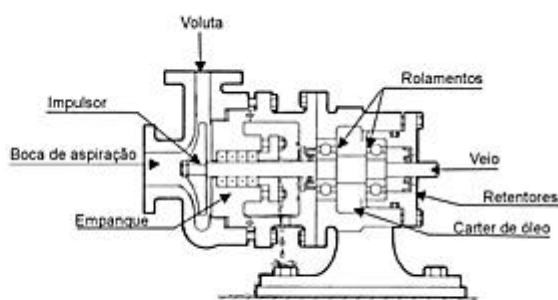


Figura 5: Bomba centrífuga e respetivo esquema (Adapt. [2]).

- Bombas de escoamento axial – Neste tipo de bombas o líquido entra axialmente e sai quase axialmente. A pressão é gerada principalmente pela ação da sucção e destina-se essencialmente a baixas alturas de elevação e grandes caudais;

- Bombas de escoamento misto – O líquido entra axialmente e sai numa direção média entra axial e radial. A pressão é gerada tanto por meio da força centrífuga como pela ação da sucção das pás sobre o líquido. A sua utilização é destinada, usualmente para alturas médias de elevação e de caudal.

As bombas centrífugas que serão alvo de especial atenção neste trabalho são hoje em dia as mais correntemente utilizadas em Estações Elevatórias de Águas Residuais (EEAR), podendo estas serem classificadas consoante a localização do motor e da bomba. Podem então genericamente ser categorizadas da seguinte forma (Tentúgal Valente, 2014):

- Submersível com motor e bomba totalmente submersos: Exige pouco espaço, tendo também a vantagem de ser de fácil acesso à bomba, necessitando, no entanto, o motor de especial atenção ao nível da manutenção. O caudal máximo de elevação anda à volta dos 200 l/s e as alturas de elevação máximas na ordem dos 35-40 metros;

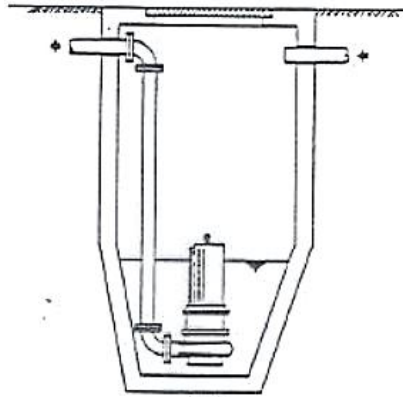


Figura 6: EE com bomba e motor submersos (Tentúgal Valente, 2014).

- Submersível com motor a seco e bomba submersa: Elevado custo e obras de construção civil bastante complexas. Os caudais elevados poderão atingir os 100 l/s, com alturas de elevação na ordem dos 40 metros. Porém a existência de um eixo de transmissão considerável, poderá causar alguns empenamentos.;

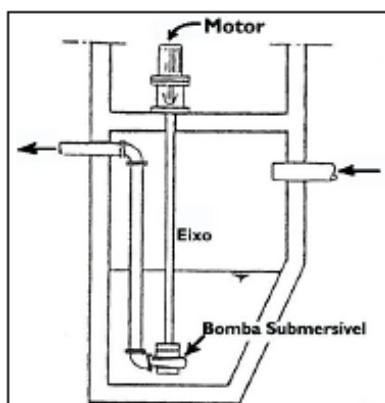


Figura 7: EE com motor a seco e bomba submersa (Tentúgal Valente, 2014).

- Não submersível de eixo vertical: Tendo a vantagem de necessitar de pouco espaço para instalação das bombas, são muito utilizadas quando a câmara de aspiração está situada a uma cota baixa, o que de outra forma obrigaria a uma construção civil avultada. O seu custo, tanto de aquisição como de manutenção é bastante elevado.

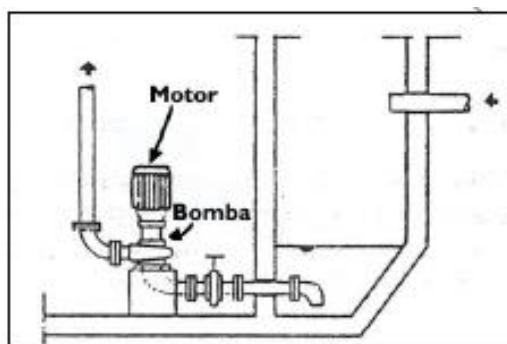


Figura 8: EE com bomba não submersível de eixo vertical (Tentúgal Valente, 2014).

- Não submersível de eixo horizontal: Requer um espaço e obras de construção bastante significativos, o que acaba por tornar esta solução bastante dispendiosa. Têm ainda a desvantagem de necessitar de um eixo intermediário.

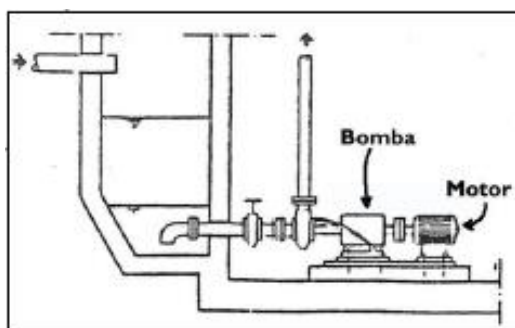


Figura 9: EE com bomba não submersível de eixo horizontal (Tentúgal Valente, 2014).

Resumidamente:

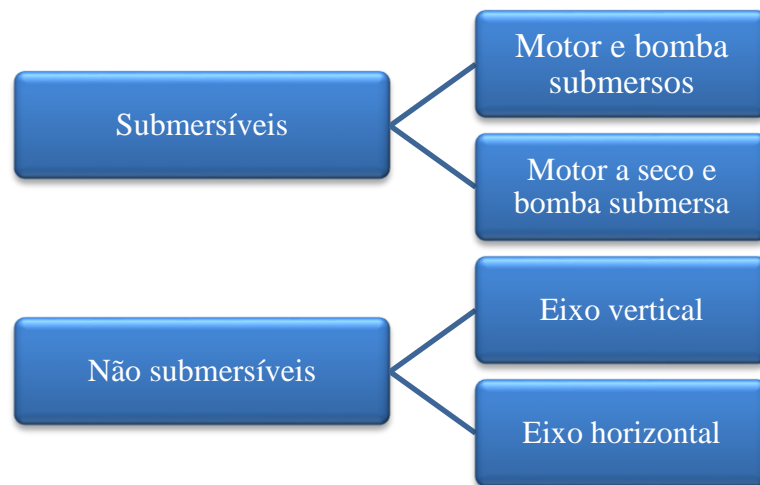


Figura 10: Esquema dos tipos de bombas centrífugas.

Utilizadas cada vez mais frequentemente as bombas centrífugas com motor de velocidade variável, adaptam-se a grandes variações de caudais afluentes, conjugando as vantagens dos parafusos de Arquimedes com as das bombas centrífugas de velocidade constante. São, no entanto, bastante caras.

2.2. CONSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA ELEVATÓRIO DE ÁGUAS RESIDUAIS

2.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Num sistema elevatório, como já foi referido, os grupos elevatórios são a componente principal. No entanto, o poço de bombagem à qual vão afluir os caudais a elevar também tem uma importância significativa, sendo o seu dimensionamento fundamental para o correto funcionamento das EEAR.

Apesar destes dois órgãos serem os mais relevantes, é óbvio que existem outros, como a conduta elevatória e a câmara de chegada, entre outros, sem os quais o correto funcionamento, manutenção e controlo destes sistemas não estariam assegurados.

De seguida será feita uma breve exposição destes elementos, bem como as suas características e recomendações de construção para cada um deles, não esquecendo a regulamentação existente, à qual qualquer projeto de construção de uma EEAR deverá obedecer.

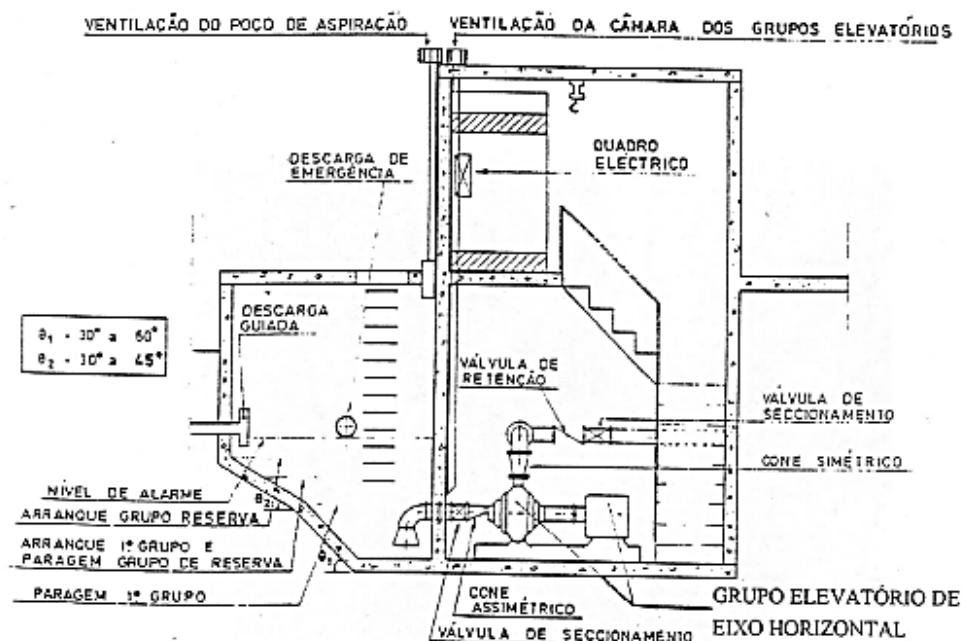


Figura 11: Estação Elevatória (Tentúgal Valente, 2014).

2.2.2. CÂMARA DE CHEGADA

A chegada de caudais às estações elevatórias pode ser processada de duas maneiras distintas (Patto, 1990):

- Acesso direto – O coletor de chegada dos caudais afluentes liga-se diretamente ao poço de bombagem;
- Acesso através de uma câmara de chegada – Funciona como uma interface entre o coletor de chegada e o poço de bombagem. Normalmente são incorporados nestas câmaras instrumentos de prevenção à entrada de materiais sólidos, de forma a evitar entupimentos.

Os instrumentos mais frequentemente usados estão apresentados na tabela seguinte (Patto, 1990):

Dispositivo	Características
Grelhas	Essenciais em qualquer EEAR, pois evitam a entrada de materiais sólidos no poço de bombagem, o que poderia causar avarias nas bombas. Podem ser do tipo manual ou automático
Trituradores	Preço e manutenção bastante consideráveis, pelo que são raramente utilizados. Além disso alguns grupos já tem a capacidade de tritar os materiais sólidos, que chegam junto com o esgoto.

Desarenadores

Estes dispositivos são especialmente utilizados no caso de redes unitárias, ou redes de estações balneares, para separação das areias provenientes.

Tabela 1: Dispositivos de proteção.

Nesta interface, deve ser também instalada uma válvula de seccionamento, bem como uma descarga de emergência a montante da válvula, para que em caso de necessidade de reparações e limpeza, seja mais fácil a execução destas tarefas.

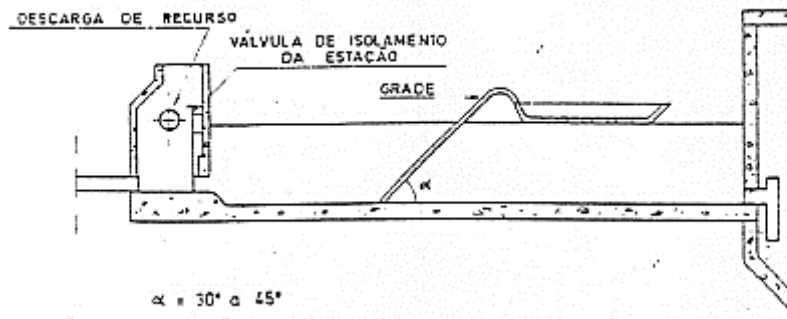


Figura 12: Interface de ligação entre o coletor e o poço de bombagem (Tentúgal Valente, 2014).

2.2.3. POÇO DE BOMBAGEM

Também denominado como câmara de aspiração, a conceção do poço de bombagem, deve seguir um conjunto de indicações de forma a evitar constrangimentos no seu funcionamento. O seu fundo deve ser inclinado cerca de 20° a 30° por forma a permitir o escoamento de lamas, que acabam por se depositar, em direção à zona de aspiração das bombas. A transição da parede vertical para a laje de fundo deve ter um ângulo de 45° para evitar zonas bastante angulosas (Fernandes, 2008).

As suas paredes devem ser revestidas com uma tinta espessa, de maneira a proteger o material constituinte da câmara da ação corrosiva das águas residuais (Fernandes, 2008).

Atendendo à necessidade de regularização de caudais, é obrigatório definir um volume útil para o poço de bombagem. Para a sua definição é preciso ter em conta os seguintes parâmetros (Tentúgal Valente, 2014):

- Caudais afluentes;
- Caudal de elevação;
- Tempo de retenção das águas residuais no poço de bombagem;
- Número máximo de arranques por hora dos grupos eletrobomba;
- Tempo de funcionamento de cada grupo eletrobomba.

Dada a sua variabilidade, os caudais afluentes devem ser cuidadosamente analisados no dimensionamento do poço e também na escolha dos grupos eletrobomba a instalar, como veremos no subcapítulo 2.3.

O poço de bombagem deverá ser provido de um descarregador de emergência, que entrará em funcionamento no caso de ser excedido o seu volume útil (Tentúgal Valente, 2014).

2.2.4. CÂMARA DOS GRUPOS ELEVATÓRIOS

Quando os grupos elevatórios não se encontram submersos, é necessário a conceção de um compartimento onde estes possam ser alojados. Nos casos em que os grupos estão submersos, estes ficam instalados no próprio poço de bombagem (Tentúgal Valente, 2014).

Este espaço, para além dos grupos eletrobomba, incluirá os órgãos de segurança e controlo, bem como todos os acessórios indispensáveis à montagem e desmontagem dos grupos. As suas dimensões terão de ser de acordo com as exigências a que estas câmaras estarão sujeitas, como as operações de acesso às bombas e aos elementos complementares lá montados, como válvulas de seccionamento e retenção (Tentúgal Valente, 2014).

2.2.5. INTERFACE ESTAÇÃO ELEVATÓRIA – CONDUTA ELEVATÓRIA

Este órgão deverá ser provido de uma válvula de descarga da conduta elevatória para casos de emergência.

Será necessário também um dispositivo de ligação da tubagem interior da estação à conduta elevatória, pois normalmente os materiais e diâmetros são diferentes.

É nesta interface também que são ligados os dispositivos de proteção ao choque hidráulico, como por exemplo os reservatórios de ar comprimido. Poderá ser instalado também um medidor de caudal, apesar de ser raro, pois normalmente esta contagem não é feita a jusante da ligação ao RAC, uma vez que assim não saberíamos os caudais elevados pelas bombas durante os regimes transitórios (Tentúgal Valente, 2014).

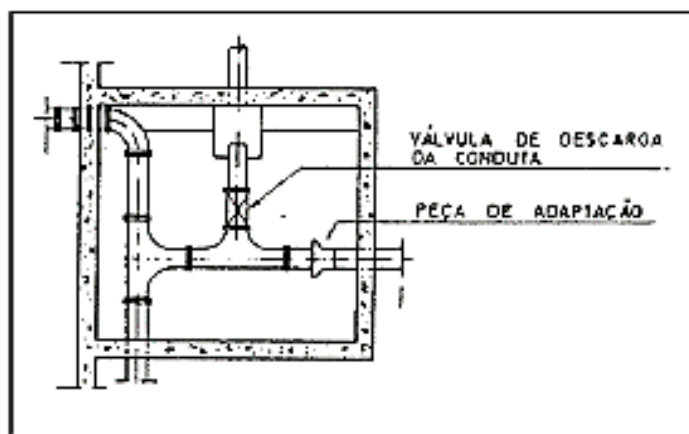


Figura 13: Interface estação elevatória - conduta elevatória (Patto, 1990).

2.2.6. CONDUTA ELEVATÓRIA

Situada a jusante da estação elevatória, a conduta elevatória revela-se fundamental na definição do volume útil do poço de bombagem, bem como na escolha das bombas a instalar.

Segundo o Artigo nº175 do Decreto Regulamentar nº 23/95, as condutas elevatórias devem respeitar os seguintes parâmetros (DR nº 23/95, 1995):

- O diâmetro interior mínimo deve ser de 100 mm, evitando assim entupimentos;
- De maneira a ser garantido o arrastamento de materiais sólidos, deve ser respeitada uma velocidade mínima de escoamento de 0.7 m/s;
- A linha piezométrica nunca deve intersectar o perfil longitudinal da conduta mesmo para situações de caudal nulo;
- A ocorrência de regimes transitórios (choque hidráulico) deve ser estudada e analisada a necessidade de dispositivos de proteção como os RAC ou volantes de inercia;
- Ventosas devem ser instaladas (nos pontos altos) só quando for estritamente necessário, pois ao contrário de condutas de abastecimento de água tem de se ter em conta que o esgoto larga odores que poderão causar algum transtorno à população. Nestes casos devem ser usadas ventosas de construção especial para esgotos;
- Devem também ser instaladas descargas de fundo (nos pontos baixos), para situações em que ocorra a necessidade de esvaziamento devido a ações de manutenção e reparação;
- A extensão da mesma não deve ser muito grande de maneira a evitar a formação de gás sulfídrico.

A respeito da inclinação, o Artigo nº 133 do mesmo Decreto Regulamentar aconselha que esta não seja inferior a 0.3% nem superior a 15% (DR nº 23/95, 1995).

Ao nível dos tipos de materiais a utilizar, o Artigo nº 142 do mesmo decreto recomenda o uso dos seguintes (DR nº 23/95, 1995):

- Fibrocimento (Atualmente já não se usa este material, devido ao potencial cancerígeno do amianto, um dos produtos constituintes do fibrocimento);
- PVC;
- Ferro Fundido;
- Aço.

Aconselha ainda o Artigo nº 143 o uso de uma proteção conveniente no interior da tubagem devido às características agressivas do fluido em questão. Caso o solo ou as águas freáticas envolventes à conduta sejam também quimicamente agressivas deve ser prevista uma proteção exterior.

De salientar ainda que as pressões na tubagem não devem ser inferiores a 0.8 MPa, podendo em condutas não muito relevantes, atingir o valor de 0.6 MPa. (Patto, 1990).

2.2.7. OUTRAS CONSIDERAÇÕES E ACESSÓRIOS

Ventilação

Indispensável em EEAR, pois existe sempre uma determinada quantidade de águas residuais que ficam retidas, entrando em decomposição e libertando gases tóxicos.

A ventilação do poço de bombagem deve ser independente da câmara dos grupos elevatórios. Em ambas as câmaras, a ventilação deve fazer-se por insuflação de ar, para que desta forma se possa manter a pressão positiva no interior, e assim reduzir a possibilidade de entrada de gases provenientes do esgoto.

Um tubo ou coluna de ventilação prolongado até à atmosfera, é suficiente em estações mais pequenas e sem pessoal permanente. Um diâmetro de 100 mm será suficiente (Tentúgal Valente, 2014).

Entrada das águas no poço de bombagem

Quedas guiadas, deflectores, câmaras de amortecimento ou tubos em T devem ser instalados, evitando assim o arrastamento de ar para os grupos eletrobomba, prevenindo desta forma a ocorrência de cavitação ou a excessiva ondulação junto das sondas de regulação de níveis, o que poderia fazer acionar as bombas sem necessidade (Fernandes, 2008).

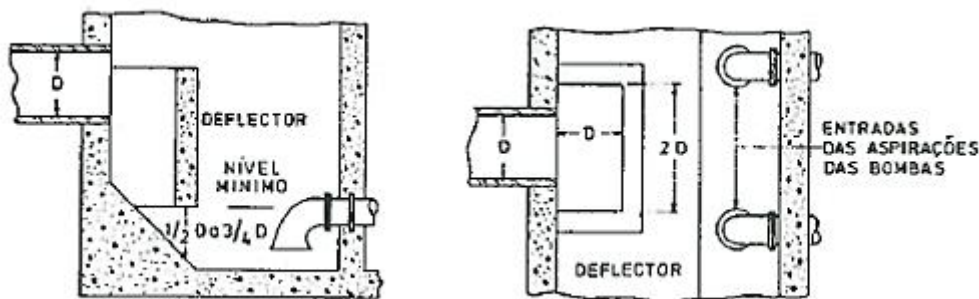


Figura 14: Correta entrada das águas no poço de bombagem (Patto, 1990).

Regulação de níveis

O acionamento ou paragem das bombas será feito através de sondas que estão interligadas entre os comandos destas e o quadro elétrico. Estas sondas são normalmente boias que estão em flutuação no esgoto armazenado no poço de bombagem, com interruptores de nível. Consoante a sua inclinação, o que depende no nível da água na câmara, estes interruptores estabelecem então contato com o quadro elétrico, dando ordem de funcionamento ou paragem das bombas (Tentúgal Valente, 2014).

Imaginemos então, por exemplo, uma EE equipada com dois grupos elevatórios em funcionamento simultâneo no máximo, isto é, uma situação de 2+1 (o +1 representa o grupo eletrobomba de reserva que terá de existir em todas as EE, para precaver situações de emergência ou avarias). Neste caso deverá ser previsto:

- Um interruptor de nível mínimo dando indicação de paragem da 1ª bomba;
- Um interruptor de nível mínimo dando indicação de paragem da 2ª bomba;
- Um interruptor de nível intermédio determinando arranque da 1ª bomba;
- Um interruptor de nível máximo determinando o arranque da 2ª bomba;
- Um interruptor de nível máximo extra (designado nível de alarme) ligado a um alarme acústico e/ou luminoso.

Os primeiros quatro justificam-se pelo facto de as duas bombas poderem funcionar em simultâneo, o que irá ocorrer possivelmente diversas vezes devido a variabilidade de caudais afluentes. Já o último interruptor justifica-se mais por uma necessidade de segurança (Fernandes, 2008).

Não existem regras para os níveis a que se devem instalar estes interruptores, sendo, no entanto, aconselhável que o nível mínimo coincida com o nível mínimo de esgoto no poço de bombagem, mantendo desta forma a bomba sempre em carga (Tentúgal Valente, 2014). Poderá, também, haver limitações de submersão dos grupos.

Em estações cujas bombas estejam submersas o nível de paragem da 1ª bomba deve ser tal que permita que esta continue imersa, de modo a evitar corrosões.

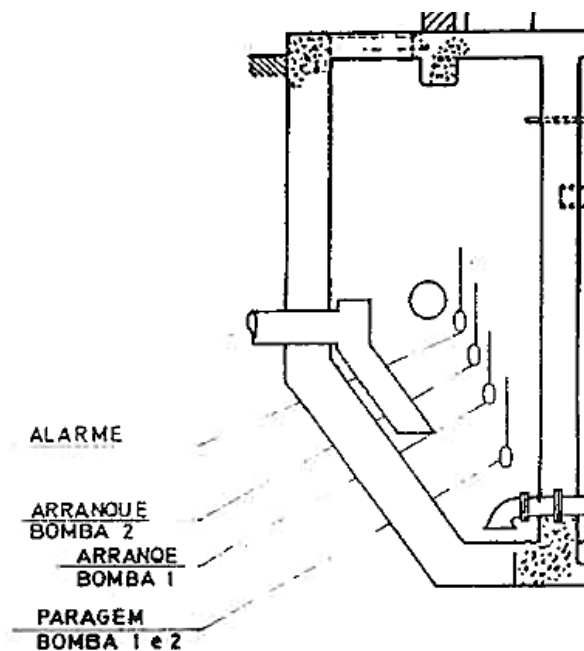


Figura 15: Regulador de Nível (Tentúgal Valente, 2014).

Descarga de Emergência (Tentúgal Valente, 2014).

Localizada no poço de bombagem acima do nível máximo para o qual este foi dimensionado, funcionará em situações críticas/emergência, como por exemplo um dia bastante chuvoso, o que fará aumentar os caudais afluentes, ou uma situação de corte de energia elétrica.

Acessórios e instrumentos (Tentúgal Valente, 2014).

- Válvulas de seccionamento e de retenção: Fundamentais em qualquer EEAR, devem ser instaladas sempre em conjunto por cada grupo elevatório existente. Válvula de seccionamento localizada sempre a jusante da de retenção;
- Quadro elétrico: Onde reunir-se-ão todos os órgãos de comando, controlo e proteção;
- Manómetros: Só se a bomba estiver colocada a seco, pois o ambiente húmido danificaria este instrumento;
- Medidores de gases;

- Circuitos de iluminação e tomadas de corrente;
- Instrumentos de manobras dos grupos como, guinchos, *monorails* e outros;

2.3. DIMENSIONAMENTO

2.3.1. CAUDAL AFLUENTE

O primeiro parâmetro a definir num projeto de dimensionamento de uma EEAR, será o caudal que vai afluir à mesma. No entanto este parâmetro é bastante difícil de fixar devido aos vários tipos de caudais afluentes que vão existir e à variabilidade destes.

Podemos então considerar que o caudal afluente à EEAR, será o seguinte (Monteiro, 2004):

$$Q_{afl,total} = Q_{AR,dom} + Q_{AR,ind} + Q_{inf} \quad (1)$$

Onde,

- $Q_{afl,total}$: Caudal afluente total;
- $Q_{AR,dom}$: Caudal águas residuais domésticas;
- $Q_{AR,ind}$: Caudal águas residuais industriais;
- Q_{inf} : Caudal de infiltração.

2.3.1.1. Caudais de águas residuais domésticas

A quantificação dos caudais de águas residuais domésticas vai depender sobretudo da população para a qual a rede de drenagem vai ser dimensionada. É então indispensável determinar a mesma e prever a sua evolução expectável até ao ano horizonte de projeto (normalmente considera-se 40 anos).

Consultando os Censos facilmente se obtém a população para o presente ano, usando depois modelos de regressões é possível ter uma ideia da evolução que esta terá (Monteiro, 2004).

Este caudal pode ser estimado através da seguinte expressão:

$$Q_{AR,dom} = Pop \times Cap \times F_{afluencia} \quad (2)$$

Onde,

- Pop: População (habitantes);
- Cap: Capitação de consumo de água (l/hab/dia);
- $F_{afluencia}$: Fator de afluência.

O Artigo nº 13 do DR nº 23/95 aconselha o uso dos seguintes valores para a capitação de consumo (DR nº 23/95):

População	Capitação
Ate 1000 habitantes	80 l/hab/dia
De 1000 ate 10000 habitantes	100 l/hab/dia
De 10000 ate 20000 habitantes	125 l/hab/dia
De 20000 ate 50000 habitantes	150 l/hab/dia
Acima de 50000 habitantes	175 l/hab/dia

Tabela 2: Capitações de consumo (Adapt. DR nº 23/95, 1995).

O fator de afluência tem o objetivo de refletir os caudais que são consumidos, mas que nunca chegam à rede de drenagem. O DR nº 23/95 aconselha o uso de um valor entre 0.7 e 0.9.

2.3.1.2. Caudais de águas residuais industriais

Na contabilização das afluências industriais deve ser feita uma inventariação das unidades industriais existentes, bem como uma previsão das que poderão vir a existir, na zona que a EE irá servir. Deste modo poderão ser conhecidos os caudais rejeitados e estimados os futuros caudais, bem como as suas características físicas, químicas, biológicas e bacteriológicas. (DR nº 23/95, 2015).

2.3.1.3. Caudais Infiltrados

Os caudais infiltrados são os de mais difícil quantificação pois podem ter diversas origens. Estes caudais provêm da água existente no solo (dependem do nível freático), e resultam da falta de estanquidade existente nas redes de drenagem (Artigo nº126 do DR 23/95). No entanto, devido a ligações indevidas das redes de águas pluviais aos coletores de águas residuais, poderão também afluir às EE caudais de origem pluvial.

Sugere o Artigo nº 126 do DR nº 23/95, desde que não se disponha de dados e informações sobre o local, os seguintes valores (proporcionais ao diâmetro, Ø, e ao comprimento, L, dos coletores):

Estado dos Coletores	Qinf
Recentes ou a construir	0.5 m ³ /dia /Ø (cm) / L (km)
Precária construção e conservação	4.0 m ³ /dia /Ø (cm) / L (km)

Tabela 3: Caudais Infiltrados (Adapt. DR nº 23/95, 1995).

2.3.2. CAUDAL A ELEVAR

Este parâmetro é muito difícil de definir na medida em que os caudais afluentes são bastante variáveis ao longo do dia. Por outro lado, é também necessário conjugar o valor do caudal a elevar com o volume do poço de bombagem, respeitando os tempos máximos de retenção (Tentúgal Valente, 2014).

Os sistemas elevatórios de águas residuais são dimensionados para o valor máximo do caudal afluente no ano horizonte de projeto, o que em sistemas como estes, que são um exemplo claro de um processo

de bombagem controlado pela variação do caudal afluente, irá originar uma operação ineficiente em situações de menores afluências. Este é um dos grandes problemas destes sistemas, que será analisado nos próximos capítulos deste trabalho (Leite, 2010).

Outro aspeto a ter em conta é que o caudal de bombagem será também o caudal de dimensionamento da conduta elevatória, o que terá de ser compatibilizado com os critérios de velocidade e diâmetro mínimos impostos pelo regulamento, mencionados em 2.2.6. Estes critérios podem ser fundamentais na fixação do caudal de bombagem, sobretudo em casos de pequenos volumes de águas residuais afluentes (Tentúgal Valente, 2014).

Numa primeira aproximação, recomenda a literatura da especialidade considerar um valor de 1.0 a 1.5 do $Q_{af, total}$ ao poço de bombagem no ano horizonte de projeto. Este valor pode, no entanto, vir a sofrer alterações consoante as restantes condições de funcionamento a respeitar (Tentúgal Valente, 2014).

2.3.3. CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO

A curva característica da instalação será a curva que traduz, para cada caudal, a altura de elevação que será necessária vencer para essa mesma instalação. Cada ponto da curva representa a soma da altura geométrica com as perdas de carga (contínuas e localizadas) no sistema, para um determinado caudal (Grundfos, 2005).

As perdas de carga aumentam segundo uma relação de segundo grau com o caudal (ver figura 16), podendo então a CCI ser representada pela seguinte expressão:

$$H = f(Q^2) \rightarrow H_{man} = H_{geo} + \sum J_i L_i + \sum k_i \frac{U^2}{2g} \quad (3)$$

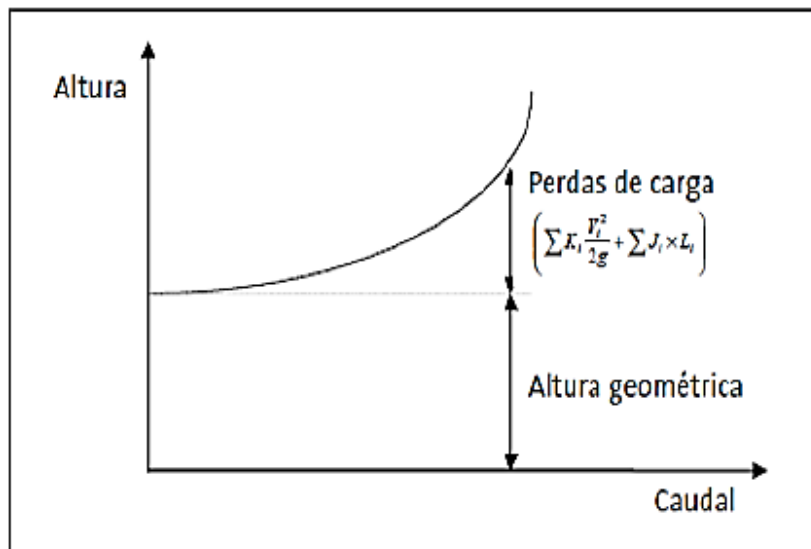


Figura 16: Curva característica da instalação (CCI) (Grundfos, 2005).

Onde,

- H_{man} : Altura Manométrica (m);
- H_{geo} : Altura Geométrica (m);
- $\sum J_i L_i$: Perdas de carga contínuas;
- $\sum k_i \frac{U^2}{2g}$: Perdas de carga localizadas.

A altura geométrica em sistemas elevatórios de águas residuais, pouco se irá alterar devido à baixa capacidade de regularização do poço de bombagem, estando então na diminuição das perdas de carga, um dos grandes fatores para o aumento da eficiência energética em EEAR (Leite, 2010).

Como foi descrito em cima as perdas de carga crescem segundo uma relação de 2º grau com caudal, logo a otimização do binómio capacidade de bombeamento/caudais afluentes permite aumentar o nível global de eficiência dos grupos eletrobomba (Leite, 2010).

2.3.4. CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA

Definidos o caudal a bombear e a altura a elevar, segue-se a seleção da bomba que melhor resposta pode dar as necessidades do sistema a dimensionar. Esta seleção deverá inicialmente ter em atenção a velocidade angular pretendida, o que para o caso das águas residuais será baixa, depois em função do caudal e altura manométrica definidos em projeto, por intermédio de diagramas-mosaicos (ver figura 17), selecionar a bomba que melhor rendimento apresentará para o sistema elevatório em questão. Por fim poderemos tentar selecionar o diâmetro do impulsor mais indicado, otimizando assim os consumos energéticos (Ribeiro, 2014).

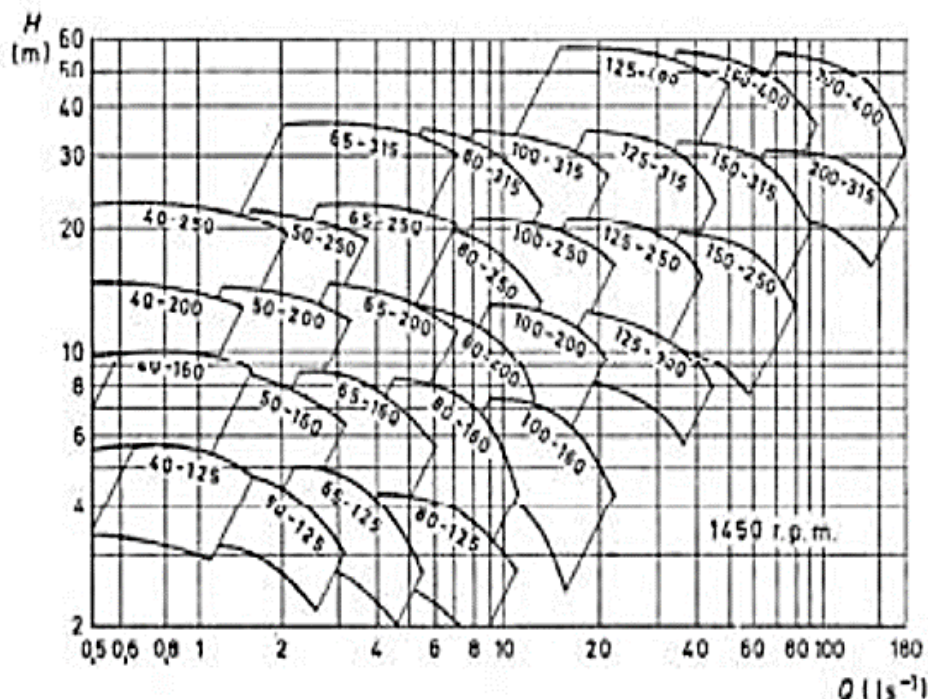


Figura 17: Diagrama em mosaico, para seleção de bombas com velocidade de rotação de 1450 rpm (Ribeiro, 2014).

Escolhida a bomba, facilmente se obtém o ponto de funcionamento (ver figura 18) da bomba para a respetiva instalação. Este ponto corresponde à interceção da CCB (H_{man}/Q) com a CCI e representa o caudal que irá ser elevado por aquela instalação. A CCB pode também ser representada nos binómios variação de rendimento/caudal (η/Q) ou potência/caudal (P/Q), fornecendo assim o rendimento e a potência assegurados pela bomba para o caudal elevado (Ribeiro, 2014).

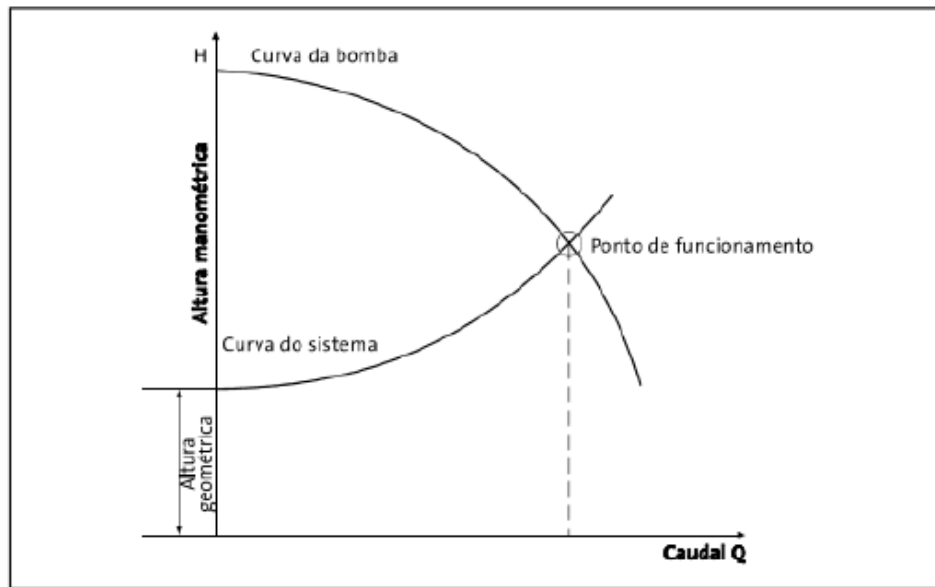


Figura 18: Ponto de funcionamento de uma bomba (Grundfos, 2005).

É importante referir que variadíssimas vezes este ponto não corresponde ao caudal e altura de elevação definidas na fase de projeto, levando a rendimentos diferentes dos previstos.

Em estações elevatórias de águas residuais, os caudais afluentes variam bastante ao longo do dia. Assim a adoção do caudal máximo afluente no ano horizonte de projeto como caudal de bombagem irá provocar tempos de funcionamento da bomba muito curtos e arranques mais frequentes, o que aumenta significativamente os custos de energia. A adaptação do caudal bombeado à variação dos caudais afluentes, traduzir-se-á numa redução dos custos de energia. A instalação de bombas com variadores de velocidade pode ser uma das soluções (Leite, 2010).

2.3.5. POÇO DE BOMBAGEM

Como já referido em 2.2.3, atendendo à necessidade de regularização do poço de bombagem devido à variabilidade dos caudais afluentes, é imperioso definir um volume útil adequado para o mesmo. Por outro lado, existe também a necessidade de conjugar este parâmetro com o número máximo de arranques por hora dos grupos elevatórios. (Tentúgal Valente, 2014)

Deve então este volume ser calculado em função destes parâmetros, com o objetivo de evitar tempos de retenção maiores que 5-10 minutos para os caudais médios afluentes (DR nº 23/95, 1995)

Sejam então t_1 o tempo de enchimento do volume útil do poço de bombagem, $V_{\text{útil}}$, e t_2 o tempo de funcionamento da bomba, Q_A o caudal afluente e Q_B o caudal de bombagem (Tentúgal Valente, 2014):

$$t_1 = \frac{V_{\text{útil}}}{Q_A} \quad (4)$$

e,

$$t_2 = \frac{V_{\text{útil}}}{Q_B - Q_A} \quad (5)$$

Assim sendo, podemos considerar que $t_1 + t_2$ é um ciclo de bombagem completo (tempo contendo um período de esvaziamento do poço e um período de enchimento do poço).

Igualando as equações (4) e (5) temos que:

$$t_2 = \frac{Q_A t_1}{Q_B - Q_A} \quad (6)$$

Por outro lado, rapidamente constatamos então que o inverso de $t_1 + t_2$, será o número de arranques da bomba (N) por unidade de tempo, normalmente uma hora:

$$N = \frac{3600}{t_1 + t_2} \quad (7)$$

Outro parâmetro a não esquecer é o tempo de retenção das águas residuais na conduta elevatória (t_c). Designe-se então por t_3 o tempo de demora para percorrer a conduta, W o número de ciclos de bombagem e t_4 o tempo de paragem na conduta e:

$$t_3 = \frac{\pi D^2 L}{4 Q_B} \quad (8)$$

e,

$$W = \frac{\text{Volume da conduta}}{\text{Volume bombeado em cada ciclo}} = \frac{((\pi D^2)/4) L}{Q_B t_2} \quad (9)$$

Multiplicando o número de ciclos de paragem pelo tempo t_1 , considerando o número inteiro mais próximo de W, obtemos t_4 :

$$t_4 = (1 + \text{Int}(W)) \times t_1 \quad (10)$$

O tempo de retenção do esgoto na conduta, t_c , é então calculado pela soma de t_3 com t_4 .

Habitualmente há que verificar as seguintes condições (Tentúgal Valente, 2014):

- Tempo máximo de retenção no poço de bombagem: $t_1 + t_2 \leq 10$ minutos;
- Tempo máximo de retenção das águas residuais: $t_1 + t_3 + t_4 \leq 2$ horas;
- Tempo de funcionamento da bomba: $t_2 > 60$ segundos;
- Tempo de repouso dos grupos: $t_4 > 180$ segundos.

O número de arranques máximo das bombas, normalmente fornecido pelo fabricante, deve ser um valor razoável consoante a potência da bomba. Ao nível de eficiência energética não é muito recomendável um número elevado de arranques por hora, pois é quando os consumos de energia atingem o seu máximo, sendo então importante conjugar este número com o caudal a ser bombado (Leite, 2010).

3

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

A otimização energética representa uma excelente oportunidade de redução de custos em sistemas elevatórios de águas residuais onde o consumo de energia contribui para o mais significativo custo durante o seu ciclo de vida.

Neste capítulo dar-se-á ao leitor uma breve noção da preponderância que os custos de energia têm no custo global de um sistema elevatório, podendo nos sistemas de maior dimensão chegar a valores na ordem dos 80 a 90%. Devido à tendência crescente dos custos de energia, tanto em Portugal como na União Europeia, o tema da eficiência energética acaba por se tornar uma questão essencial em termos de sustentabilidade económica.

Nesse sentido as entidades gestoras, dão cada vez mais importância a estes problemas, usando desde 2005 um conjunto de indicadores de avaliação cujos resultados são publicados num relatório anual, o Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal (RASARP). Far-se-á então também neste capítulo uma exposição destes indicadores, bem como as especificidades de cada um.

Segue-se uma descrição das principais soluções de otimização existentes, não existindo, devido às especificidades de cada sistema elevatório, soluções predefinidas como as melhores comparativamente às outras. É necessário, por isso, a realização de planos de otimização energética (POE) cujo objetivo é, numa primeira fase, avaliar e analisar o funcionamento real dos grupos eletrobomba integrados no sistema elevatório, procurando posteriormente, e consoante os problemas detetados, escolher a solução que melhor resposta dará às reais necessidades da instalação.

3.1. ENQUADRAMENTO

Estima-se que a nível mundial o consumo de energia dos sistemas de bombeamento existentes, nas suas mais variadas aplicações (abastecimento público e predial; transporte e tratamento de águas residuais; instalações de rega, etc) representa cerca de 20% do consumo de energia elétrica global (Grundfos, 2005).

Trata-se assim de um consumo considerável, principalmente tendo em conta que a questão energética assume um papel importante a nível nacional e mundial.

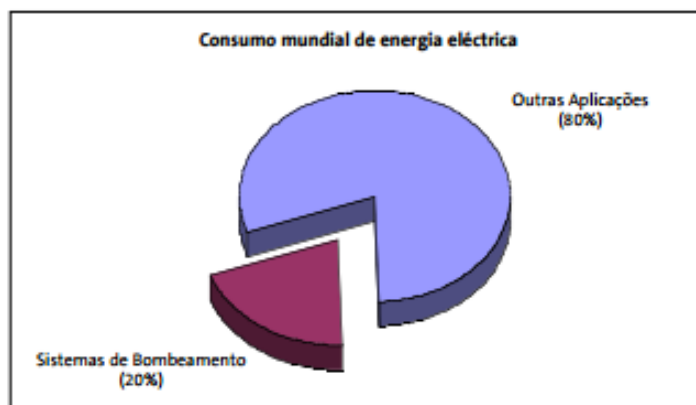


Figura 19: Consumo de energia a nível mundial (Grundfos, 2005).

No que diz respeito a Portugal, estima-se que o consumo de energia elétrica do setor da água ascende aos 1000 GWh por ano, sendo que destes, 350 GWh, provêm das águas residuais. Os grupos eletrobomba, sendo a componente central dos sistemas de drenagem de águas residuais, representam 65% do total do consumo de energia no setor da água (Vivas, 2014).

Conclui-se desta forma, que a questão da eficiência energética acaba por ser relevante em termos de sustentabilidade económica. Esta ideia é reforçada devido à tendência crescente dos custos de energia elétrica no seio da União Europeia, e também em Portugal, sendo o nosso país um dos que atinge preços mais altos de energia.



Figura 20: Crescimento do custo da energia elétrica em Portugal [3].

Surge assim a necessidade de estudos de otimização energética, sendo o caso das EEAR uma excelente oportunidade de redução dos custos e rentabilização económica, pois estas são caracterizadas por variações relevantes do caudal afluente, estando o seu dimensionamento centrado no caudal máximo afluente, o que provoca operações ineficientes e irregulares na maior parte do tempo (Vivas, 2014).

3.2. INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal (RASARP), concluiu que a eficiência energética dos sistemas elevatórios de água residual é mediana tanto para o setor em “baixa” como para o setor em “alta” estando, no entanto, o setor em “baixa” mais próximo de uma qualidade de serviço insatisfatória. Todavia a situação pode ser ainda mais problemática visto que uma percentagem relevante das entidades gestoras não respondeu. Estas conclusões têm base no indicador da ERSAR AR11 ($\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot 100\text{m})$) que já faz parte da segunda geração de indicadores de eficiência energética em estações elevatórias (ERSAR, 2014). Referir que estes indicadores são respetivos ao ano de 2013, logo publicados no RASARP de 2014.

Quadro 108. AR11 baixa e alta – Valores de referência [$\text{kWh}/(\text{m}^3 \cdot 100\text{m})$]	
Qualidade do serviço boa	[0,27; 0,45]
Qualidade do serviço mediana	[0,45; 0,68]
Qualidade do serviço insatisfatória	[0,68; +∞[

Figura 21:Valores referência do Indicador ERSAR AR11 (ERSAR, 2014).

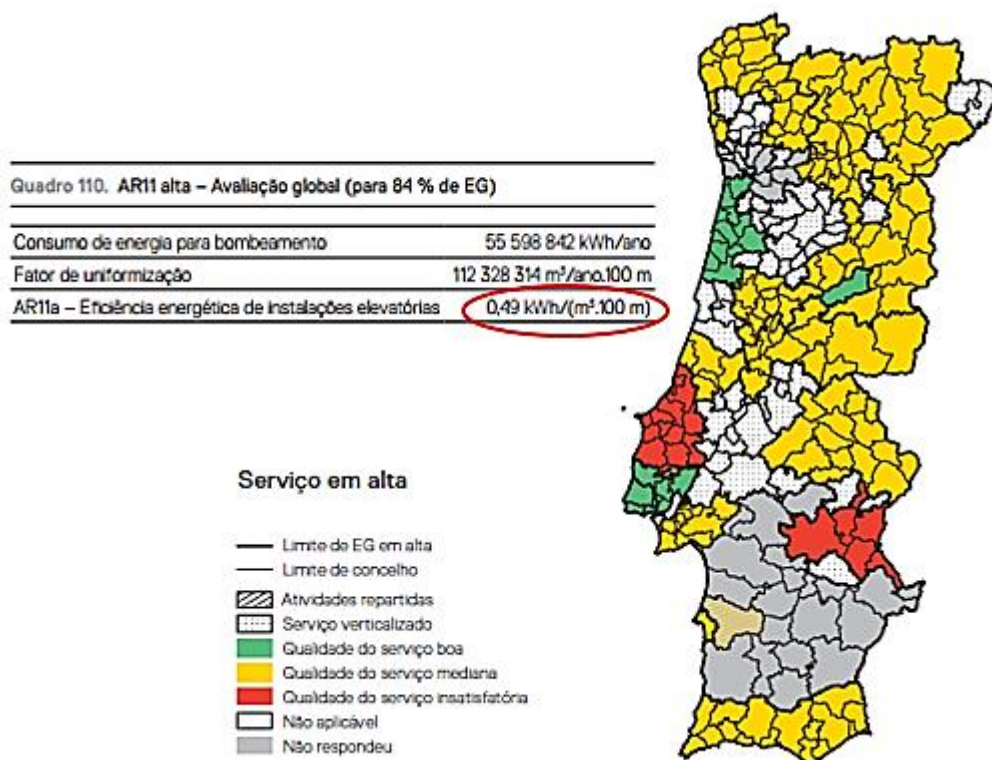


Figura 22:Distribuição geográfica da avaliação do indicador AR11 - Setor em alta (ERSAR, 2014).

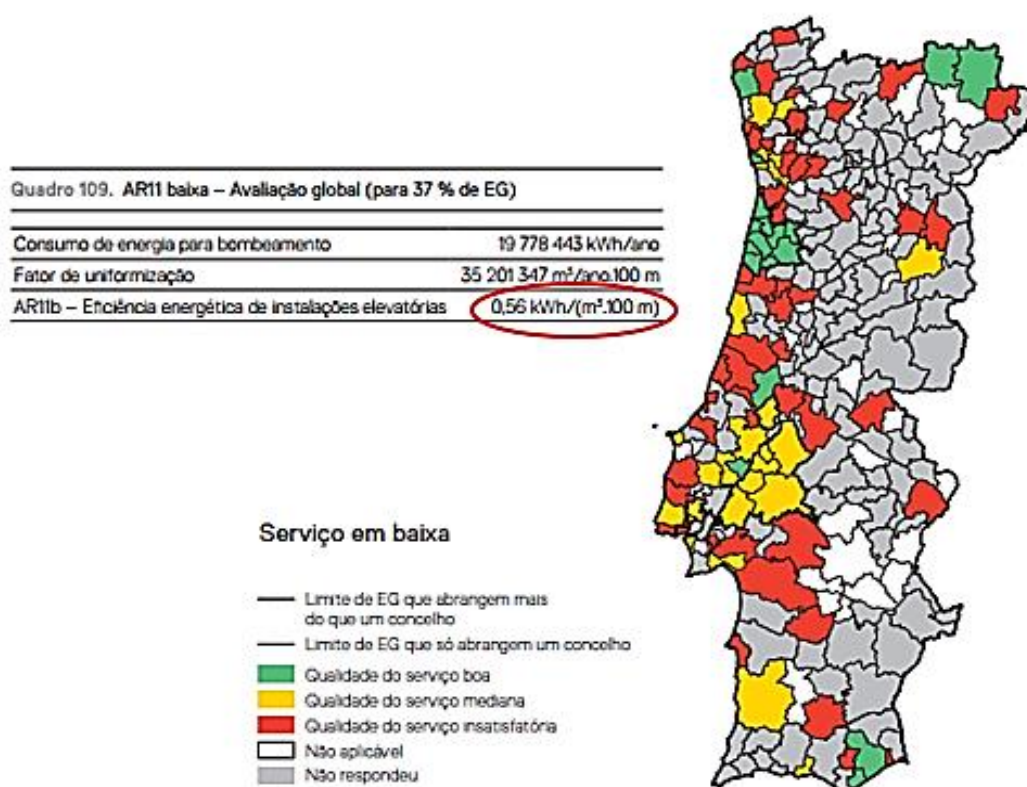


Figura 23: Distribuição geográfica da avaliação do indicador AR11 - Setor em baixa (ERSAR, 2014).

Com os valores obtidos considera-se, então, ainda haver margem para melhorar, sendo essenciais as entidades gestoras terem a noção da necessidade de fazer um esforço no sentido do aumento da eficiência energética nas instalações elevatórias, com o objetivo de atingir um nível ótimo de sustentabilidade económica e ambiental.

Neste sentido existem diversas soluções de otimização, sendo que a opção pela solução ideal requer um estudo global do funcionamento do sistema, na situação atual, bem como uma simulação do seu comportamento para a solução de otimização adotada, de maneira a permitir ter um consumo mais racional da energia. Porém, apesar destes estudos de otimização poderem ser executados em todo o tipo de sistemas elevatórios, o potencial de otimização será bastante diferenciado.

Justifica-se assim a realização de uma avaliação preliminar ao conjunto de estações elevatórias existentes, de forma a serem identificadas quais as que serão dada prioridade nos estudos de otimização, permitindo potenciar o investimento. Esta seleção poderá ser feita com base num conjunto de indicadores de eficiência, entre os quais o já citado Indicador da ERSAR (Vivas, 2014).

3.2.1. ENERGIA ESPECÍFICA (ES)

A Energia Específica (ver expressão 11) é bastante útil no cálculo do custo de bombagem de um dado sistema elevatório, sendo também válida para efetuar comparações entre as possíveis soluções de otimização do sistema. Em sistemas com apenas um ponto de funcionamento, este cálculo torna-se bastante simples, no entanto quando existem vários pontos de funcionamento, a determinação deste parâmetro implica um cálculo ponderado, por volume bombeado, da energia específica de cada ponto de funcionamento (Vivas, 2014).

$$Energia Especifica (Es) = \frac{Energia consumida}{Volume Bombeado} \text{ (kWh/m}^3\text{)} \quad (11)$$

Em sistemas com desnível geométrico praticamente irrelevante, a Energia Especifica, vai depender apenas das perdas de carga do sistema, que são função do caudal e da combinação do rendimento (η) dos componentes (ver expressão 12).

$$Energia Especifica (Es) = \frac{H_{man} \gamma}{3.6 \cdot 10^6 (\eta_{variador} \eta_{motor} \eta_{bomba})} \text{ (kWh/m}^3\text{)} \quad (12)$$

Onde,

- H_{man} : Altura Manométrica (m);
- γ : Peso Volúmico (N/m³)

Já quando o desnível geométrico é significativo, este índice apresenta limitações na análise comparativa entre sistemas elevatórios distintos pois passa a integrar a parcela correspondente ao desnível geométrico. Esta parcela faz aumentar o consumo de energia por unidade de volume, não sendo passível de ser minimizada ou eliminada pois trata-se de um parâmetro fixo do sistema.

No entanto este índice apresenta vantagens na comparação de soluções de otimização para o mesmo sistema elevatório.

3.2.2. INDICADOR ERSAR

Com o objetivo de amenizar as limitações da Energia Especifica na análise comparativa de sistemas elevatórios distintos, o indicador ERSAR (ver expressão 13) permite homogeneizar a parcela da altura manométrica (H_{man}) (Vivas, 2014).

$$Indicador ERSAR = \frac{Energia consumida}{Volume Bombeado \cdot Altura Manometrica} \times 100 \text{ (kWh/(m}^3 \cdot 100 \text{ m))} \quad (13)$$

Assim pode considerar-se que este indicador representa uma versão uniformizada da energia específica (ver expressão 14), incorporando basicamente o rendimento do sistema. Apresenta desta forma uma relação direta com o rendimento do sistema, sendo a escala de classificações (ver figura 21) também obtida pelos valores correspondentes de rendimento.

$$Indicador ERSAR = \frac{\rho g}{\eta_{variador} \eta_{motor} \eta_{bomba}} \times 100 \text{ (kWh/(m}^3 \cdot 100 \text{ m))} \quad (14)$$

3.2.3. GREEN PUMP INDEX (GPX)

Numa abordagem de avaliação distinta, apresenta-se o índice GPX (ver expressão 15) que procura mostrar a eficiência energética do equipamento independentemente das especificidades do sistema (elevação de um determinado caudal para vencer um dado desnível geométrico), facilitando assim a comparação entre sistemas elevatórios diferentes (Vivas, 2014).

$$\text{Green Pump Index (GPX)} = \frac{Q \times H_{\text{geo}}}{3.67 \times P_{\text{ot}}} (\%) \quad (15)$$

Sendo Q, o caudal bombeado em m³/h, H_{geo} , o desnível geométrico em metros (m) e Pot, a potência elétrica consumida pelos grupos eletrobomba em kW.

Ao usar o desnível geométrico (H_{geo}) em vez da altura manométrica (H_{man}), este índice passa para o lado das possíveis otimizações as ineficiências devido às perdas de carga (contínuas e localizadas) bem como as ineficiências associadas ao rendimento dos equipamentos (bomba, motor, variador de frequência), que podem ser alvo de otimizações (Vivas, 2014).

Este índice procura também classificar o desempenho real dos equipamentos e permitir fazer uma comparação com o que potencialmente poderá ser atingido.

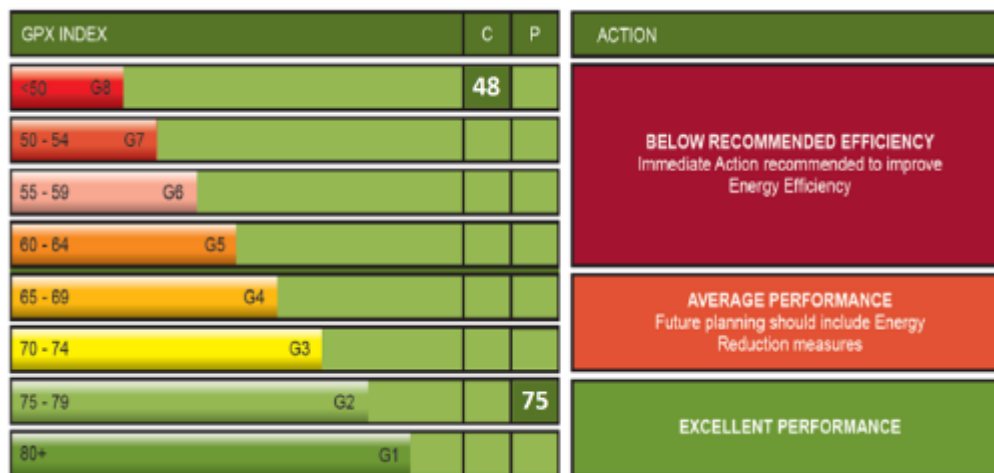


Figura 24: Escala de classificação do índice GPX, de acordo com o desempenho real "C" e o que se poderá atingir potencialmente "P" (Vivas, 2014).

3.3. CUSTO DO CICLO DE VIDA

O custo do ciclo de vida (CCV) é uma ferramenta de gestão dos custos de variados tipos de sistemas, incluindo sistemas de bombeamento, ao longo da sua vida útil. Esta metodologia foi desenvolvida pelo Hydraulic Institute (HI), o Europump e pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e permite identificar na fase de projeto e construção qual das várias soluções se poderá demonstrar mais eficiente a nível económico, ajudando assim a minimizar os desperdícios e a maximizar o rendimento.

Muitos sistemas de elevação, são concebidos considerando apenas o investimento inicial, originando grandes custos tanto de manutenção como de exploração. No entanto em sistemas elevatórios de águas residuais, cujo período de vida dos grupos eletrobomba se situa normalmente entre os 15 a 20 anos, verifica-se que uma parte significativa dos custos ocorrerão durante o período de exploração. Desta forma o CCV, devera resultar da soma de todos os principais custos associados a sistemas deste tipo (ver expressão 16), durante o seu período útil de vida (Grundfos, 2005 e Ribeiro, 2014):

$$CCV = C_{ci} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_{pp} + C_a + C_d \quad (16)$$

Onde,

- C_{ci} : Custos iniciais, refere-se aos custos de aquisição de bombas, tubagens entre outros e instalação dos equipamentos e obras de construção civil necessárias. Estes custos normalmente incluem:
 - Serviços de Engenharia;
 - Processo de construção;
 - Construção civil;
 - Inspeção e testes;
 - Peças de reserva;
 - Formação;
 - Equipamentos auxiliares para sistemas de vedação ou arrefecimento.
- C_{in} : Custos de instalação e ensaios. Incluem custos com fundações, ligações de tubagens, ligações elétricas e de instrumentação, ligações a sistemas auxiliares e avaliações e regulações no arranque;
- C_e : Custos energéticos associados à operação do sistema, incluindo controlos e quaisquer serviços auxiliares. Frequentemente é uma das parcelas com custos mais elevados, no valor final do CCV;
- C_o : Custos de operação, onde estão os custos associados à mão-de-obra e supervisão normal do sistema;
- C_m : Custos de manutenção e reparação, onde se inserem custos relativos a reparações previstas e de rotina aos diversos equipamentos instalados nestes sistemas, tais como as bombas que requerem uma manutenção regular e eficiente;
- C_{pp} : Custos de paragens e perdas de produção, associados a períodos de tempo em que por qualquer razão a produção tem de parar ou baixar significativamente. Podem ser uma parcela bastante significativa no valor do CCV, rivalizando com os custos de energia.
- C_a : Custos ambientais, relacionados com a necessidade de destruição de fluidos contaminantes durante o tempo de vida útil do sistema de bombeamento;
- C_d : Custos de desmontagem e desmantelamento, inclui todo o tipo de restauração ambiental do local e serviços de destruição do equipamento.

Fatores financeiros como atualização do valor anual da energia, taxas de inflação e de juros, vida útil esperada para o equipamento, também devem ser tidos em conta no cálculo final do CCV.

Resumidamente, verifica-se em termos gerais que os custos mais preponderantes no CCV correspondem aos custos de energia, representando valores na ordem dos 40% dos custos finais, mostrando-se então essencial na redução destes custos o conhecimento das características da bomba, da instalação e da forma como o sistema irá operar.

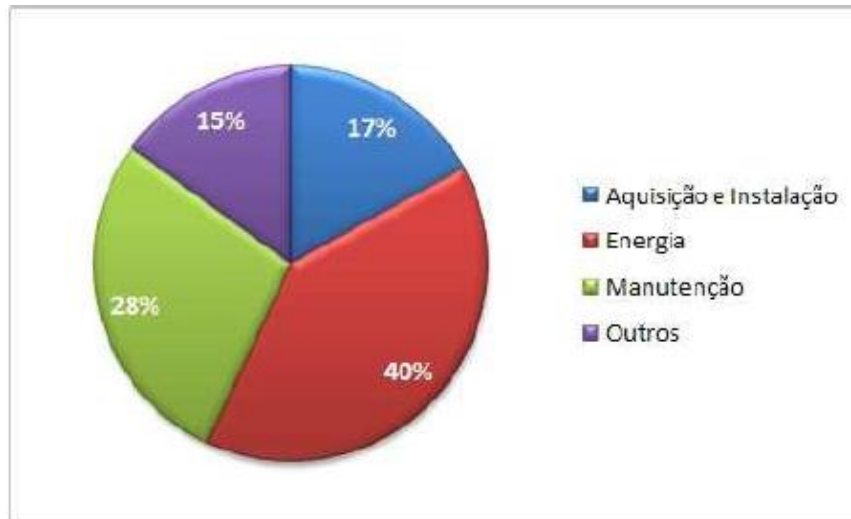


Figura 25: Principais custos no ciclo de vida de um sistema elevatório (Vivas, 2014).

3.4. BEP- BEST EFFICIENCY POINT

Todos os grupos eletrobomba possuem um ponto de rendimento máximo do motor elétrico, o “Best Efficiency Point” (BEP) e que representa o ponto de funcionamento ótimo de eficiência em termos de consumo de energia, onde todos os sistemas deveriam funcionar proximamente (Leite, 2011).

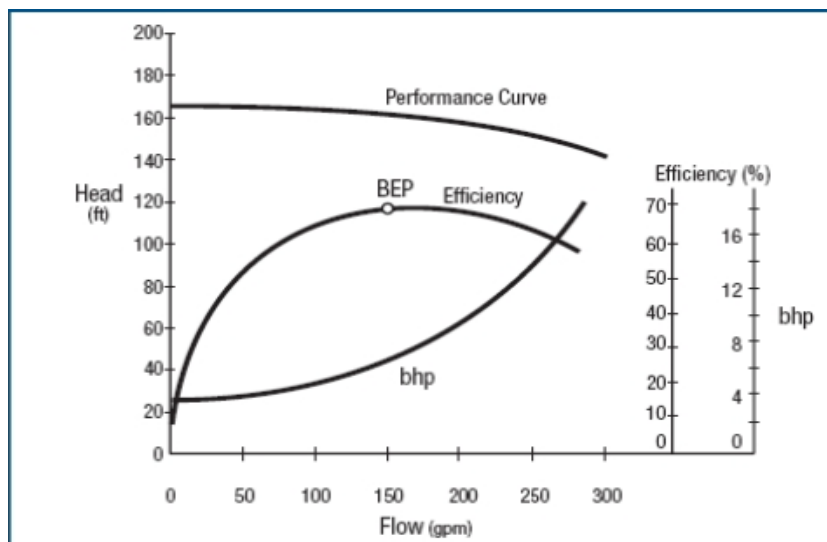


Figura 26: Exemplo do BEP para uma determinada bomba (Leite, 2011).

Considera-se recomendável um funcionamento entre os 70% e os 120 % do caudal do BEP, de forma a não diminuir demasiado o tempo expetável de vida útil dos componentes dos grupos eletrobomba e evitar a existência de fenómenos de recirculação por caudais abaixo do desejável ou situações de cavitação por caudais acima do recomendado, como é possível observar pela figura 27 (Leite, 2015).

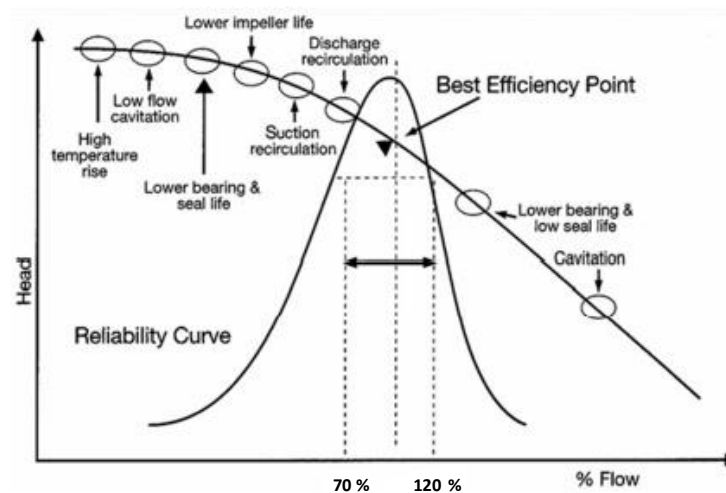


Figura 27: Problemas devido a operações afastadas do BEP (Leite, 2015)

Porém, a maior parte dos grupos eletrobomba trabalham longe do BEP, não só devido ao sobredimensionamento de que são alvo na altura de projeto como também ao natural desgaste dos impulsores, levando a operações ineficientes durante parte significativa do seu ciclo de vida. É então crucial adaptar o sistema às suas reais necessidades de bombeamento de maneira a não existirem consumos de energia desnecessários e os problemas registados acima.

3.5. SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

Como já foi referido anteriormente os sistemas elevatórios são dimensionados para o valor máximo do caudal afluente gerando operações ineficientes e irregulares que poderão ser otimizadas na fase de exploração do sistema, adaptando o caudal bombeado à variação do caudal afluente, incrementando assim os níveis globais de eficiência dos grupos eletrobomba, reduzindo ao mesmo tempo as perdas de carga e os consumos de energia.

Existem assim diversas soluções de otimização energética. No entanto, a escolha da ideal requer uma análise global do funcionamento do sistema elevatório, bem como uma avaliação do custo/benefício da implementação das mesmas. Destacam-se então as seguintes soluções (Leite, 2010):

- Escalonamento de bombas em paralelo;
- Bombas de pequena capacidade (Pony Pumps);
- Redução do diâmetro do impulsor;
- Instalação de variadores de velocidade (VFD);
- Substituição por bombas mais eficientes.

De referir ainda que algumas destas soluções são mais direcionadas para a otimização de sistemas em fase de projeto, sendo que outras (a maior parte) para sistemas elevatórios já em funcionamento.

3.5.1. ESCALONAMENTO DE BOMBAS EM PARALELO

Em alternativa à instalação de apenas um grupo eletrobomba, surge o escalonamento de bombas em paralelo como solução de otimização energética. Trata-se de uma solução mais orientada para sistemas ainda em fase de dimensionamento, visto que a sua aplicação em sistemas já em funcionamento iria acarretar custos bastante avultados, devido às diversas operações de remoção e instalação dos grupos eletrobomba.

Tratando-se de um sistema com múltiplos pontos de funcionamento é possível obter uma maior versatilidade de operação, possibilitando uma otimização do binómio capacidade de bombeamento/caudais afluentes, promovendo assim um funcionamento do sistema mais próximo das necessidades reais do mesmo. Esta situação origina um funcionamento mais próximo do ponto de maior eficiência (BEP) de cada grupo eletrobomba reduzindo assim as perdas de carga do sistema de forma bastante significativa (Leite, 2010).

Outro benefício que esta solução promove é a diminuição do número de arranques e paragens dos grupos elevatórios, o que terá influência nos consumos de energia, tendencialmente mais elevados nos momentos de arranque.

3.5.2. BOMBAS DE PEQUENA CAPACIDADE (PONY PUMPS)

Durante parte significativa do ano os valores dos caudais afluentes à EEAR são consideravelmente mais baixos comparativamente com os caudais para os quais foi dimensionado o sistema elevatório, surgindo então as “pony pumps” como solução para o bombeamento dos caudais nestas fases do ano.

Esta solução de otimização proporciona uma redução do número de arranques e paragens dos grupos eletrobomba de maior capacidade, reduzindo assim substancialmente os consumos de energia especialmente tendo em conta os maiores custos de energia na fase de arranque. Outra vantagem é a diminuição das perdas de carga contínuas, potenciando assim a redução da Energia Específica do sistema. Estas bombas são, no entanto, mais adequadas na otimização de sistemas já em funcionamento, especialmente nos que é possível detetar sinais de ineficiência, como ruído excessivo, cavitação, vibração nas tubagens, etc (Leite, 2010).

3.5.3. REDUÇÃO DO DIÂMETRO DO IMPULSOR

Especialmente interessante como solução de otimização de sistema já em funcionamento, a redução do diâmetro do impulsor tem como objetivo, tal como todas as outras soluções de otimização, o baixar das perdas de carga, bem como aproximar o funcionamento do sistema das suas reais necessidades de bombeamento, incrementando assim a eficiência global deste. No entanto em alguns casos, esta solução pode também diminuir o rendimento dos grupos eletrobomba, o que ao nível dos consumos energéticos poderá não ser prejudicial, desde que esta redução de rendimento não seja mais significativa do que o inerente decréscimo de potência hidráulica.

Reduzindo o diâmetro dos impulsores dos grupos eletrobombas, diminui-se a energia fornecida ao fluido, sem que se tenha de fazer alterações às características do motor elétrico. Pode-se então concluir

que esta solução corresponde a uma “translação” da curva característica da bomba (CCB), como demonstrado na figura 28, alcançando-se assim os objetivos acima descritos (Leite, 2010).

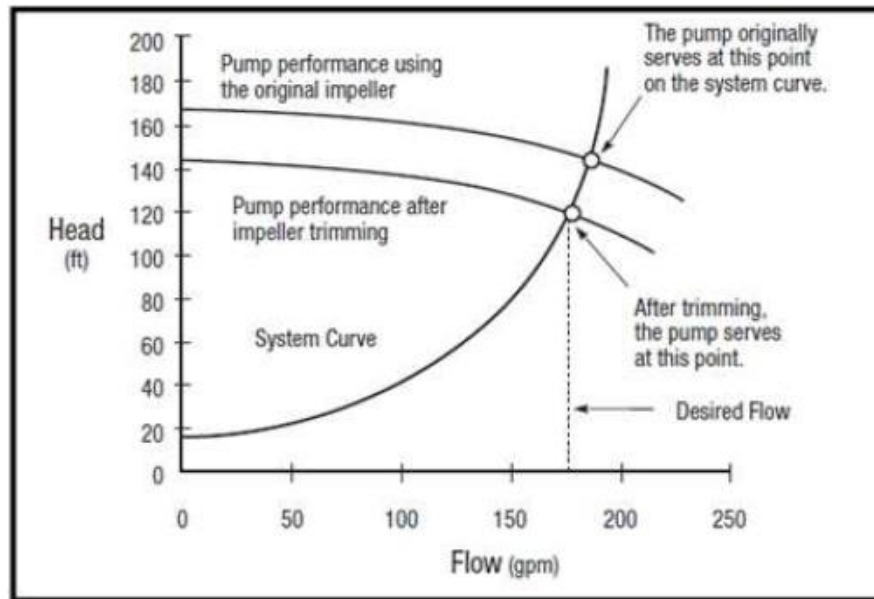


Figura 28: Efeito da redução do diâmetro do impulsor no ponto de funcionamento do sistema (Leite, 2010).

3.5.4. INSTALAÇÃO DE VARIADORES DE VELOCIDADE (VFD)

Na adoção desta técnica de otimização é necessário analisar se o sistema é controlado pela perda de carga ou pelo desnível geométrico, sendo que, neste caso, a instalação dos variadores de velocidade e consequente alteração do ponto de funcionamento, conduzirá a uma variação assinalável do rendimento do sistema, pois existe uma discrepância significativa entre o declive da tangente à curva característica da instalação (CCI) e o correspondente das tangentes às curvas de iso-eficiência dos equipamentos (Leite, 2012).

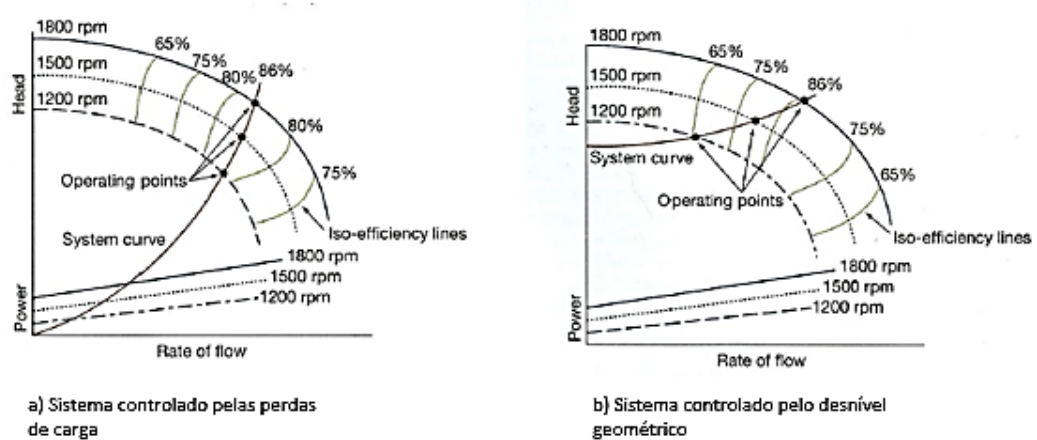


Figura 29: Efeito dos VFD nos grupos eletrobomba (Adapt. Leite, 2012).

Estes variadores de frequência permitem uma otimização do binómio caudal afluído/ caudal bombeado, conduzindo assim a importantes benefícios económicos através da diminuição dos consumos de energia. Isto é conseguido pois estes dispositivos permitem o controlo da velocidade de rotação da bomba, alterando assim a tensão e frequência da corrente fornecida ao motor elétrico.

Salientar, no entanto, que a diminuição de frequência deve ser estudada e analisada, pois a determinada altura deixa de ser vantajoso ao nível do consumo energético (figura 30), devido ao aumento da energia específica no momento em que a redução de eficiência do equipamento ultrapassa o efeito da diminuição do caudal (Leite, 2012).

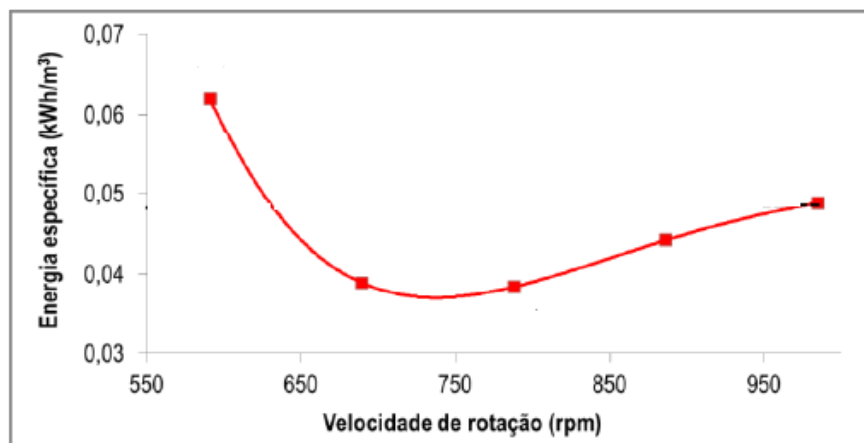


Figura 30: Variação da energia específica em função da velocidade de rotação (Adapt. Leite, 2012).

Outra das vantagens dos VFD é o aumento do período de vida dos impulsores, por consequência da diminuição das forças exercidas sobre este. A redução dos ruídos e vibrações nos grupos eletrobombas também é assinalável.

3.5.5. SUBSTITUIÇÃO POR BOMBAS MAIS EFICIENTES

Esta solução de otimização pode ser benéfica em situações de reabilitação do sistema elevatório, e em sistemas onde os equipamentos estejam bastante deteriorados ou consideravelmente desapropriados às suas necessidades, especialmente quando os consumos de energia são bastante elevados (Leite, 2010).

Nestas circunstâncias, poderá ser considerado o escalonamento de bombas em paralelo, pois como já referido em 3.5.1 os seus múltiplos pontos de funcionamento permitem uma maior flexibilidade de operações, reduzindo assim as perdas de carga do sistema e consequentemente os consumos de energia.

3.6. PLANOS DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA (POE)

No contexto atual, tendo em consideração a tendência crescente do custo da energia e a maior consciência para a sustentabilidade ambiental, as Entidades Gestoras demonstram-se cada vez mais sensibilizadas e empenhadas na maximização da eficiência, de forma a garantir uma elevada rentabilidade dos seus ativos.

Torna-se assim importante que, em qualquer sistema elevatório que demonstre sinais de ineficiência e que se ache relevante atuar de forma a otimizar o seu rendimento, se elaborem planos específicos de

otimização energética com objetivo de determinar quais as soluções de otimização, atendendo às características do sistema, se adequam melhor a este, do ponto vista técnico e económico (Leite, 2015).

Destacam-se então nos POE as seguintes 3 etapas:

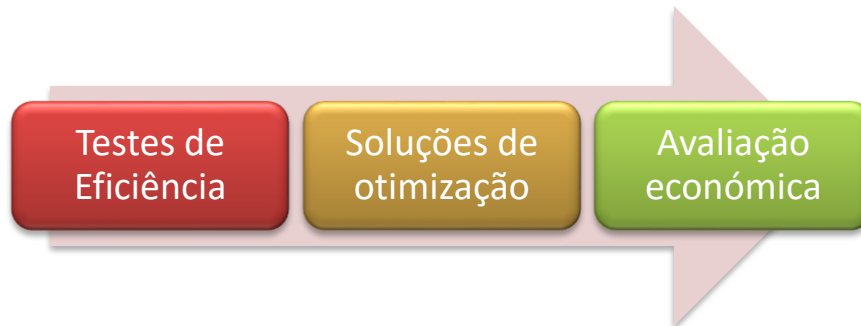


Figura 31: Etapas de implementação dos POE.

3.6.1. TESTES DE EFICIÊNCIA

Antes da realização dos testes de eficiência deverá ser feita uma visita à ou às EE que serão alvo do desenvolvimento do POE. Esta primeira visita tem como objetivo um primeiro reconhecimento do funcionamento da estação elevatória, bem como um registo de todo o tipo de material que será necessário para a execução dos testes de eficiência. Poderá esta fase também servir para recolher dados referentes às características gerais dos grupos eletrobomba (dados nas placas), assim como uma solicitação, à entidade gestora responsável pela EE, de toda a informação relevante, como caudais afluentes, volume bombeado, horas de funcionamento dos grupos, consumo de energia, etc.

Após esta primeira visita segue-se então a realização dos testes de eficiência. Estes testes revelam-se essenciais para a análise do real desempenho dos grupos eletrobomba, pois em grande parte das vezes o seu funcionamento real, quando integrado no sistema elevatório, não corresponde à informação fornecida pelos fabricantes. A degradação dos grupos elevatórios bem como dos seus componentes também constitui uma fonte de ineficiência, aumentando assim os custos devidos ao consumo de energia (Leite, 2014).

Existem atualmente dois métodos distintos para a realização destes testes (Leite, 2014):

- Método Convencional;
- Método Termodinâmico.

Ambos apresentam vantagens e desvantagens, dependendo a escolha do método a utilizar das condições apresentadas pelas EE a avaliar. Independentemente do método a utilizar, os resultados finais apresentam, para cada grupo elevatório, os vários pontos de funcionamento reais do sistema elevatório para a altura de elevação, o rendimento e a potência em função do caudal elevado. Assim existem procedimentos comuns nas duas metodologias (Leite, 2014):

- Determinação direta da potência absorvida pelo motor;
- Registo da pressão na conduta de aspiração e compressão;
- Incorporação da eficiência do motor e dos VFD, se existirem, através dos dados dos fabricantes.

O que diferencia os dois métodos é a definição do caudal elevado. No método convencional o caudal é medido *in situ*, por meio de um medidor de caudal instalado na conduta de compressão comum ou por um medidor de caudal ultrassónico portátil no caso do funcionamento do caudalímetro instalado na EE não for adequado. Este método apresenta assim limitações comparativamente ao método termodinâmico, devido à incerteza associada a este tipo de equipamentos. Por outro lado, o método termodinâmico mede diretamente a ineficiência da bomba, o que associado à medição de potência, torna possível a determinação do caudal bombeado (Leite, 2014).

3.6.2. SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO

Concluídos os testes de eficiência e analisadas todos os resultados obtidos, segue-se a fase de identificação das possíveis soluções de otimização, de acordo com o potencial de otimização verificado e as características do sistema. No entanto é essencial a quantificação dos caudais afluentes e bombados de forma a adaptar as soluções às reais necessidades do sistema elevatório. O nível de água no poço, as características dos grupos eletrobomba instalados e as perdas de carga (contínuas e localizadas) ao longo do sistema elevatório (estação e conduta elevatória), também são importantes para a determinação das melhores soluções de otimização (Leite, 2011).

As soluções possíveis existentes já foram apontadas no subcapítulo 3.5. As opções identificadas como possíveis soluções de otimização devem posteriormente ser avaliadas por ferramentas de simulação ao longo do tempo.

Deverá ser feito também uma análise dos custos devido a ineficiências, apresentando assim à entidade gestora responsável uma noção dos sobrecustos existentes, podendo estes ser parcialmente eliminados com a implementação das soluções de otimização identificadas.

3.6.3. AVALIAÇÃO ECONÓMICA

Por último deve ser feita uma análise comparativa entre as soluções de otimização estudadas ao nível económico, por forma a eleger a mais eficaz na poupança dos custos de energia. Como é compreensível, a implementação das soluções acarreta um custo também, sendo por isso interessante realizar uma análise aos tempos de retorno dos investimentos que serão necessários efetuar.

Deverá ser efetuado um plano financeiro adequado e um eventual faseamento no tempo dos investimentos, no caso de se optar por mais que uma solução de otimização (Leite, 2011).

No final deverá ser entregue à entidade gestora um relatório onde conste todo plano de otimização energética.

É aconselhável também, após a intervenção na estação elevatória, um acompanhamento, de forma a atestar a eficiência das soluções aplicadas. A aposta em manutenções preventivas aos grupos elevatórios é recomendando de modo a aumentar o período de vida expectável dos equipamentos instalados, garantindo assim poupanças significativas (Leite, 2011).

4

CASO DE ESTUDO. ESTAÇÃO ELEVATÓRIA MOLHE SUL

No presente capítulo é apresentado o estudo efetuado à Estação Elevatória de Águas Residuais do Molhe Sul situada em Vila do Conde. O objetivo deste estudo foi avaliar o nível de eficiência deste sistema elevatório e correspondente desempenho dos grupos elevatórios.

Assim, começa-se por enquadrar o sistema elevatório, no que diz respeito à sua localização e Subsistema de Saneamento de Águas Residuais ao qual pertence. Segue-se uma caracterização dos seus elementos mais importantes, como os grupos elevatórios instalados, poço de bombagem e conduta elevatória.

De seguida são demonstrados os resultados obtidos pelos testes de eficiência realizados a 3 dos 4 grupos eletrobomba incorporados na estação elevatória e é apresentada a respetiva análise.

Por último, com o intuito de compreender melhor o funcionamento do sistema elevatório e procurando, assim, posteriormente apontar algumas soluções de otimização, foram realizadas análises complementares aos resultados obtidos, tais como a curva característica da instalação para a aferição das perdas de carga existentes e a uma possível existência de situações de cavitação nos grupos eletrobomba.

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Com o intuito de aplicar as estratégias de eficiência energética mencionadas no capítulo 3, desenvolveu-se um estudo no Sistema Elevatório “Molhe Sul”, que faz parte integrante do Subsistema de Saneamento de Águas Residuais da ETAR do Ave, operacional desde 2010 e que se situa na zona limítrofe entre os concelhos de Vila do Conde e Póvoa de Varzim. Estes concelhos fazem parte do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais do Norte de Portugal, cuja exploração e gestão é da responsabilidade da empresa concessionária Águas do Norte, S.A., constituída em 29 de Maio de 2015 pelo Decreto-Lei n.º 93/2015 que resultou da agregação das empresas Águas do Douro e Paiva, S.A., Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, S.A., Simdouro – Saneamento do Grande Porto, S.A. e Águas do Noroeste, S.A.

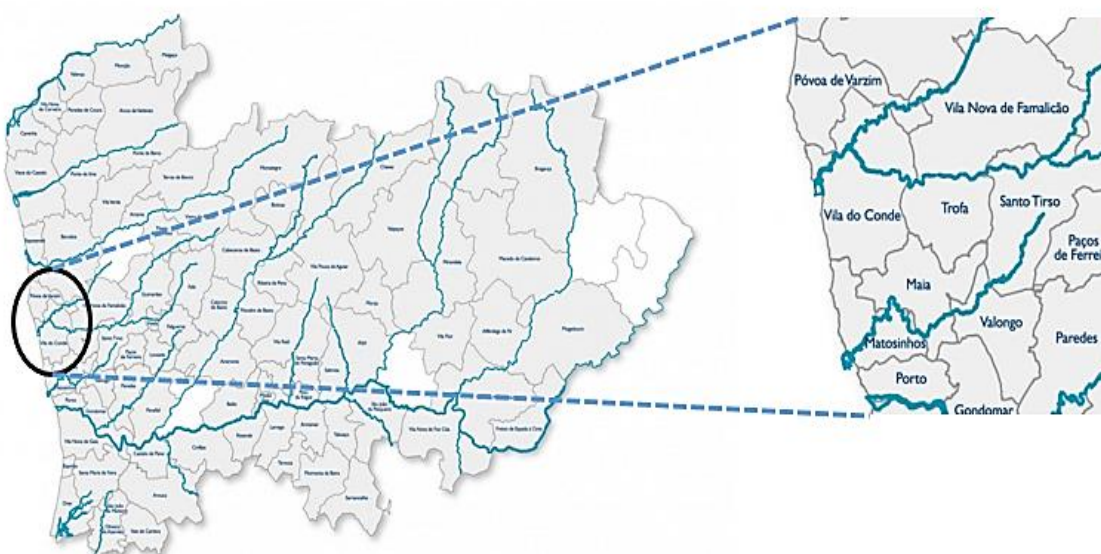


Figura 32: Área geográfica dos municípios integrados no Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais do Norte de Portugal (Adapt. [4]).

O Subsistema de Saneamento de Águas Residuais da ETAR do Ave abrange então os municípios de Vila do Conde e da Póvoa de Varzim e é constituído por uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR do Ave) situada na freguesia de Tougues, e por mais 4 estações elevatórias além da EE “Molhe Sul” que será alvo de estudo neste trabalho:

- EE de Vila do Conde;
- EE de Formariz;
- EE do Estaleiro;
- EE da Azurara

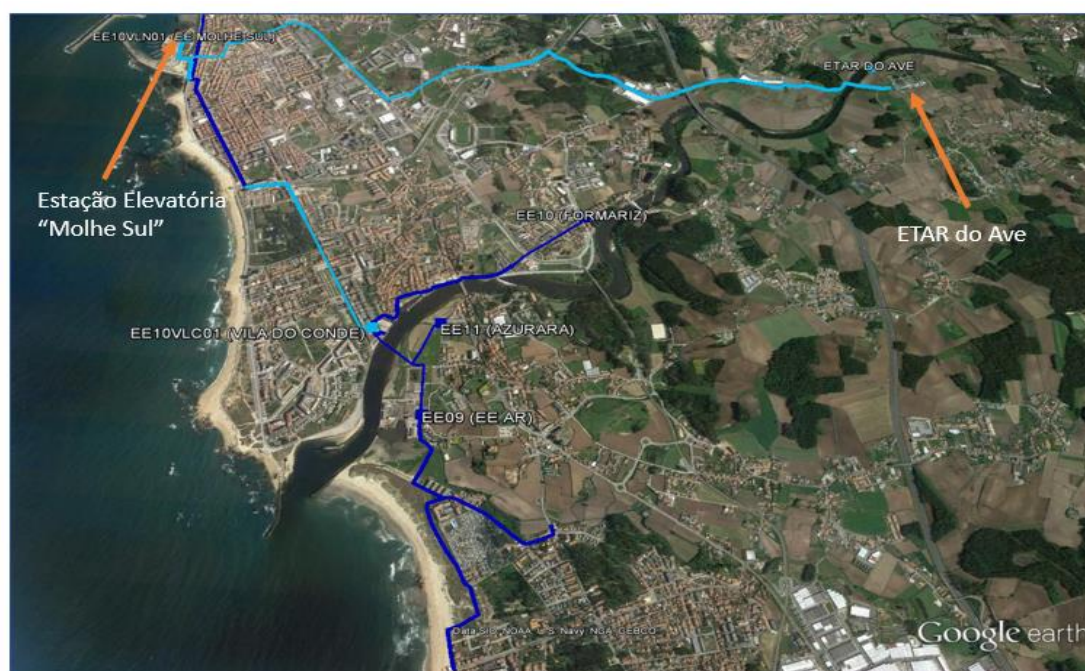


Figura 33: Vista aérea da zona abrangida pelo Subsistema de Saneamento da ETAR do Ave.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELEVATÓRIO “MOLHE SUL”

Localizada no concelho de Vila do Conde junto à Marina da Póvoa de Varzim, a Estação Elevatória do “Molhe Sul” foi projetada no ano de 2008 para um caudal máximo de bombagem de 810 l/s e uma altura manométrica de 45 m, tendo o ano de 2010 como o ano de início de exploração e 2038 como o ano horizonte de projeto.

Esta Estação Elevatória recebe caudais provenientes de outras duas estações elevatórias: EE do Forte, situada na Póvoa de Varzim, com uma capacidade de 420 l/s e da EE de Vila do Conde com uma capacidade de 300 l/s. Além destes caudais receberá também graviticamente águas residuais domésticas geradas nas bacias de drenagem VCD 7 a VCD 10, VCD 12 e VCD 13, correspondentes a uma população aproximada de 19840 habitantes.

Esta Estação Elevatória fica depois encarregue de conduzir os caudais afluentes até à ETAR do Ave.



Figura 34: Estação Elevatória "Molhe Sul".

Para além dos órgãos indispensáveis em qualquer EE, como o poço de bombagem e os grupos elevatórios, esta estação elevatória está equipada com os seguintes elementos:

- Câmara de chegada ou entrada e válvulas de isolamento;
- Gradagem (2 grades: 1 mecânica e outra manual);
- Zona de órgãos de manobras e segurança;
- Sala de tratamento de desodorização;
- Espaço para os quadros elétricos e instrumentação;
- Sala do gerador de emergência;
- Posto de transformação;
- Instalações sanitárias.



Figura 35: Câmara de chegada.



Figura 36: Sistema de gradagem.

Estão também instaladas válvulas de seccionamento do tipo borboleta e de retenção do tipo esfera nas condutas de compressão dos grupos elevatórios.

De salientar ainda que a Estação Elevatória está provida de um Reservatório de Ar Comprimido (RAC), de maneira a proteger o sistema elevatório contra o choque hidráulico (golpe de aríete).

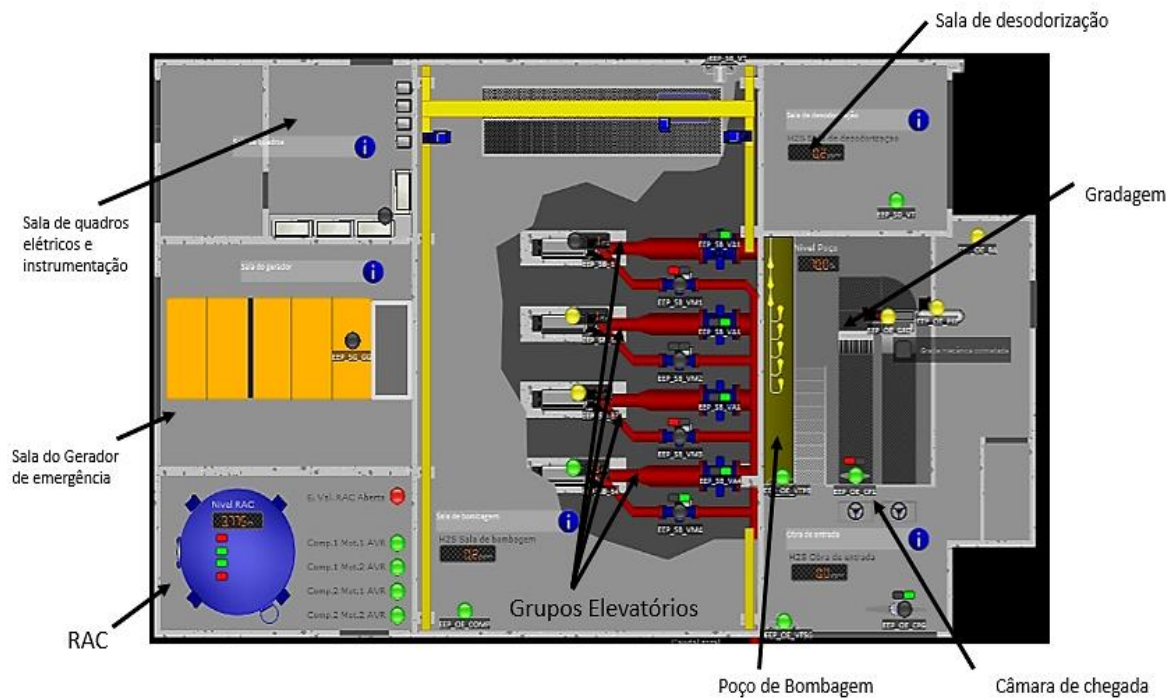


Figura 37: Planta e identificação dos equipamentos da EE "Molhe Sul".

4.2.1. POÇO DE BOMBAGEM

O poço de bombagem (7,20 x 8,50 x 4,00) tem um volume total aproximado de 245 m³ e um volume útil de 150 m³. A cota de fundo do poço encontra-se a -5,1 m e o afastamento entre os níveis de arranque e paragem dos grupos elevatórios, controlados por interruptores de nível do tipo bóia, é de 2 metros (entre os 4 e os 6 metros de altura de água).

Antes das águas residuais afluírem ao poço, passam pelo sistema de gradagem instalado, retendo assim os elementos sólidos de maiores dimensões passíveis de provocar avarias nos grupos elevatórios.



Figura 38: Poço de bombagem.

É importante ainda referir que o nível baixo de alarme teve em conta a altura necessária para garantir a submersão mínima de maneira a garantir a não entrada de ar nos tubos de aspiração das bombas. Esta altura foi definida de acordo com as necessidades dos grupos elevatórios instalados.

4.2.2. GRUPOS ELEVATÓRIOS

A Estação Elevatória está equipada com 4 grupos elevatórios (3+1) idênticos, modelo ABS AFP 3002 – ME2000/4-63, arrancando estes alternadamente de acordo com o número de horas totais de cada equipamento, podendo ter no máximo três grupos em funcionamento simultâneo atingindo um caudal máximo aproximado de 833 l/s. Os grupos são de eixo horizontal e estão instalados em poço seco, como se pode constatar na figura 39.



Figura 39: Grupos Elevatórios.

Como foram instalados grupos elevatórios com capacidade de bombagem superior ao necessário, estes tem associados variadores de frequência, fazendo com que quando esteja apenas um grupo elevatório em funcionamento este trabalhe a 43 Hz e quando estejam 2 ou 3 grupos elevatórios em simultâneo estes atinjam a frequência de 50 Hz. Inicialmente estava previsto que cada grupo elevatório individualmente trabalhasse a uma frequência de 50 Hz.

Os variadores de frequência (figura 40) instalados são da marca Siemens, modelo Micromaster 430, 200 kW GX, atingindo uma eficiência de 97%.



Figura 40: Variadores de frequência.

As curvas características das bombas (figura 41, 42 e 43) instaladas foram fornecidas pelo fabricante, tendo-se a partir destas obtido as CCB's para a frequência de 43 Hz (figura 44, 45 e 46), por aplicação das leis de afinidade (semelhança de Strouhal), representadas nas equações (17), (18) e (19), permitindo assim um ajuste dos valores de caudal (Q), da altura de elevação (H), e de potência absorvida pela bomba (P) em função da velocidade de rotação da bomba (n):

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (17)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (18)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (19)$$

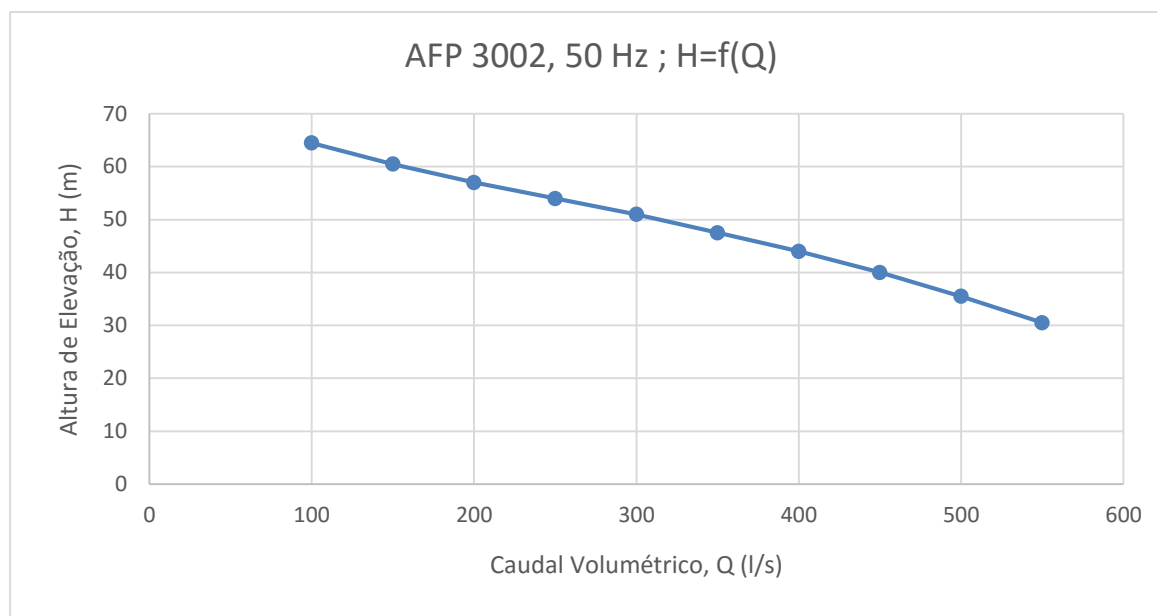


Figura 41: CCB ($H=f(Q)$) original do fabricante, 50 Hz.

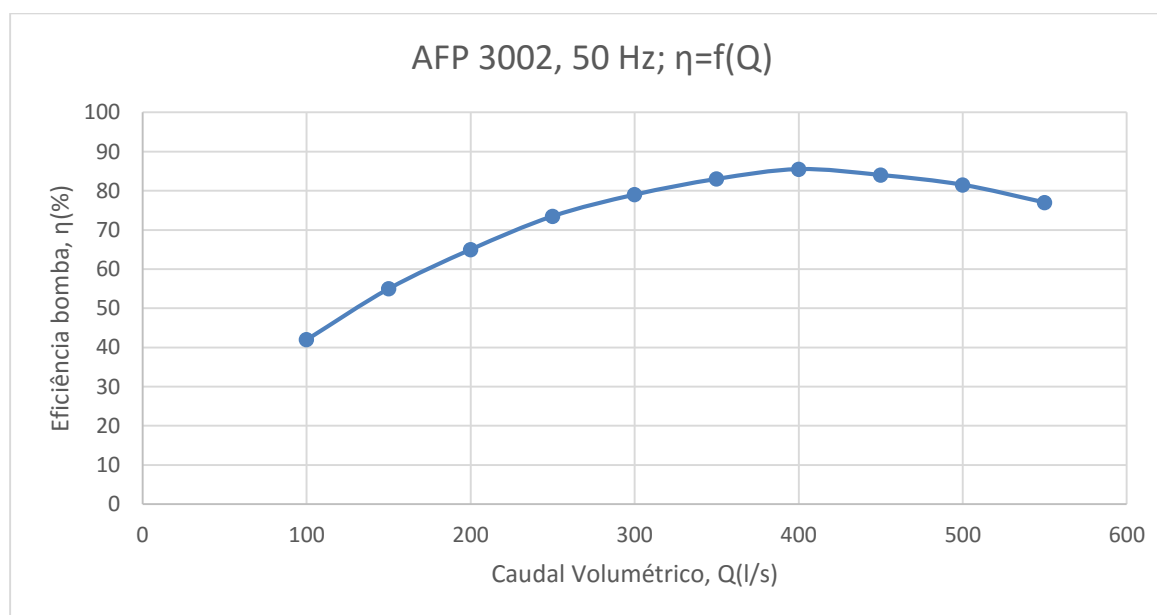


Figura 42: CCB ($\eta=f(Q)$) original do fabricante, 50 Hz.

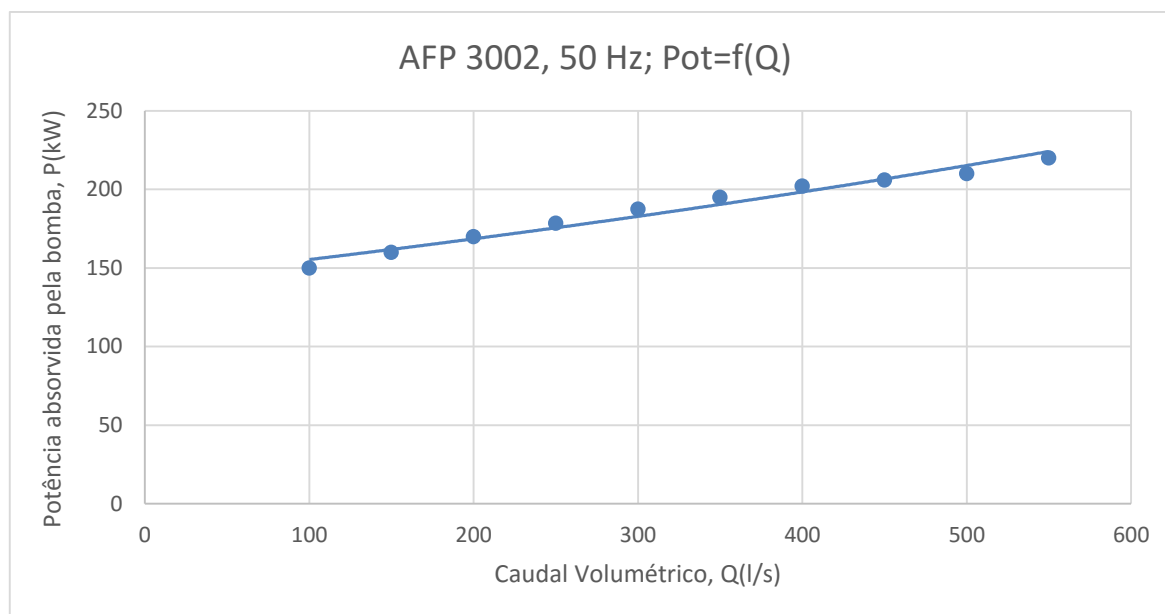


Figura 43: CCB (Pot=f(Q)) original do fabricante, 50 Hz.

As curvas características da bomba para uma frequência de 43 Hz, apresentam-se de seguida:

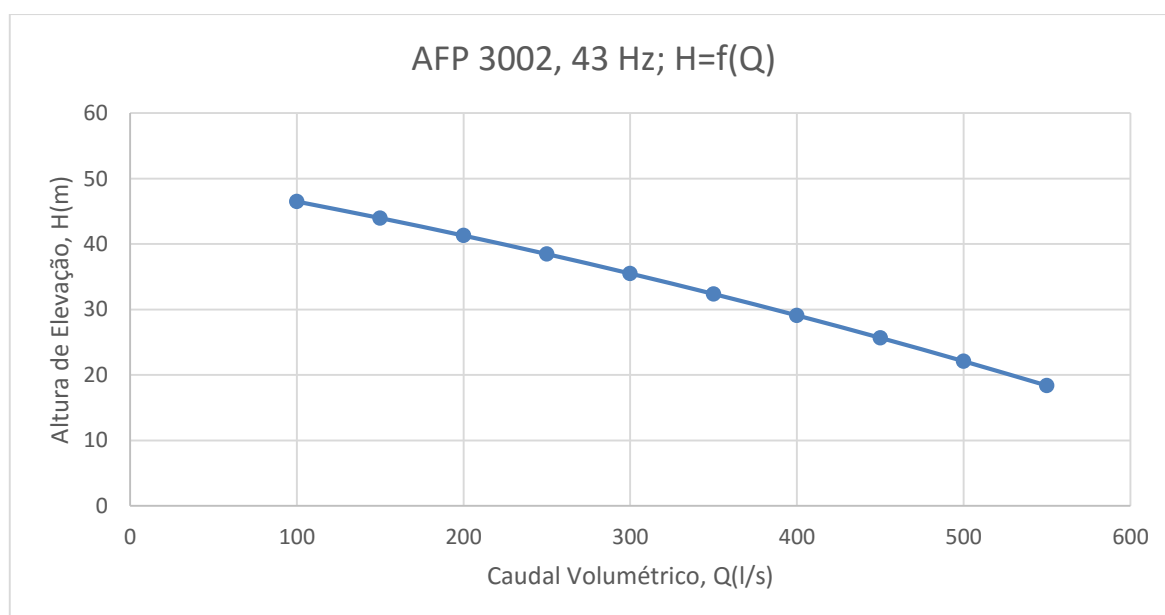


Figura 44: CCB (H=f(Q)) original do fabricante, 43 Hz.

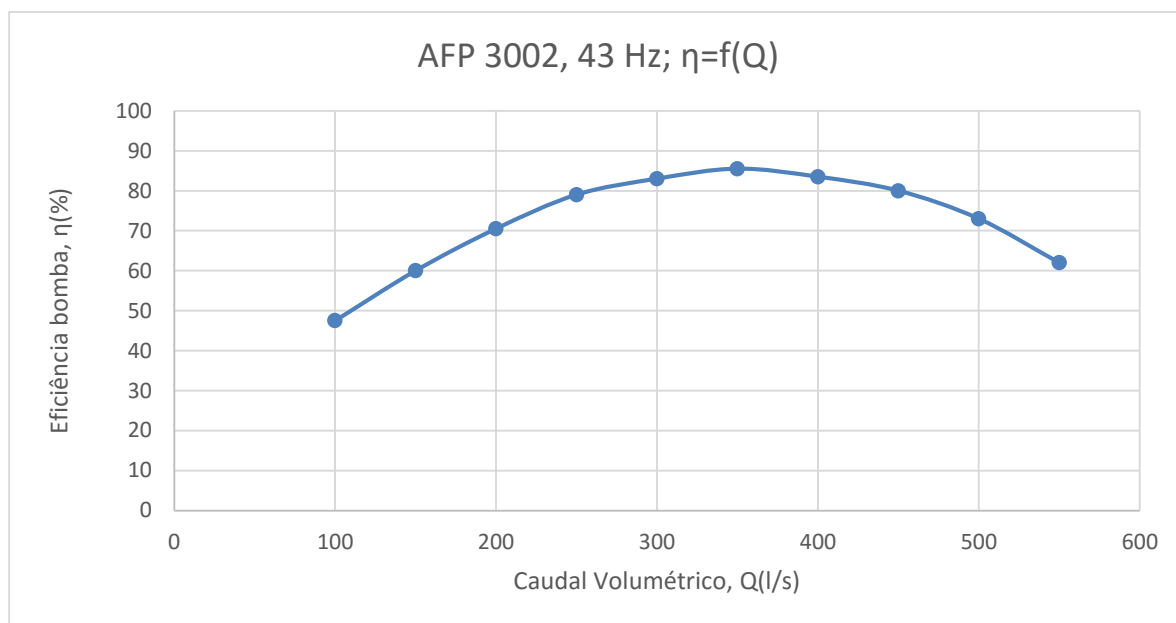


Figura 45: CCB ($\eta=f(Q)$) original do fabricante, 43 Hz.

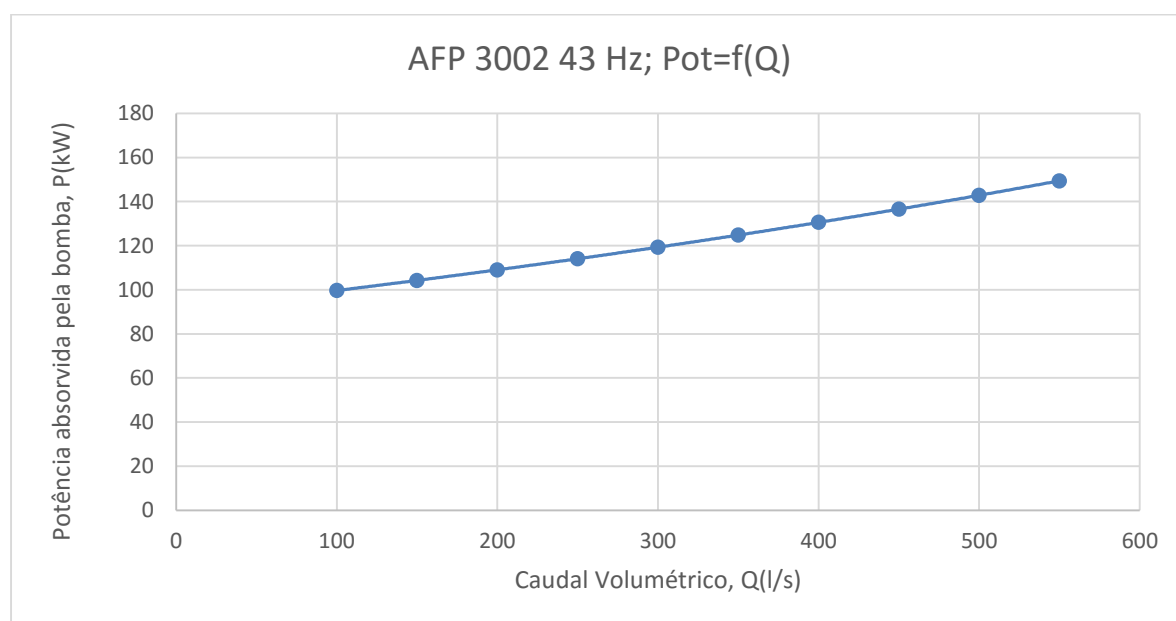


Figura 46: CCB ($Pot=f(Q)$) original do fabricante, 43 Hz.

4.2.3. CONDUTA ELEVATÓRIA

A conduta elevatória foi dimensionada de maneira a satisfazer o caudal máximo de funcionamento no ano horizonte de projeto e a velocidade mínima regulamentar imposta pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95, já citada em 2.2.6. O material utilizado foi então o Ferro Fundido Dúctil (FFD) com um diâmetro nominal de 700 mm (DN 700).

A conduta tem uma extensão de 2974,23 m e termina numa câmara de transição, sendo depois os caudais conduzidos até à ETAR por meio de um intercetor gravítico.

Respeitando o DR n.º 23/95 foram instaladas descargas de fundo nos pontos baixos e ventosas nos pontos altos da conduta. Foram também utilizadas juntas travadas permitindo assim a minimização de utilização de maciços de amarração para absorver os impulsos sobre a conduta.

4.3. TESTE DE EFICIÊNCIA

Sendo os grupos elevatórios uma das componentes principais dos sistemas elevatórios de águas residuais, quer em termos operacionais quer em termos de consumo de energia, a definição de uma manutenção preventiva baseada na avaliação periódica do desempenho dos equipamentos, atendendo de forma combinada, à análise do ponto de funcionamento e do rendimento dos equipamentos, é extremamente importante.

Os testes de eficiência surgem assim, como já referido em 3.6.1, como uma medida para essa avaliação de desempenho.

O método usado para a realização dos estudos de eficiência do presente trabalho foi o método convencional no cumprimento do especificado na *EN ISO 9906 – Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests*.

4.3.1. BREVE DESCRIÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL

O método convencional compreende a determinação dos seguintes parâmetros: caudal volumétrico bombeado, pressão a montante e jusante do equipamento e potência elétrica absorvida pelo motor.

Através destes parâmetros é então possível obter as outras variáveis essenciais para a avaliação dos grupos eletrobomba:

- Altura de elevação - H (m)
- Potência absorvida pela bomba - P (kW)
- Eficiência da bomba - η_H (%)

4.3.1.1. Altura de Elevação (H)

A altura de elevação pode ser obtida pelo cálculo da seguinte fórmula:

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho_m * g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2 * g} + \sum K * \frac{U_1^2}{2 * g} \quad (20)$$

As pressões estáticas nas secções de compressão (p_2) e aspiração (p_1) são medidas por meio de dois transdutores digitais de pressão, calibrados de acordo com a EN ISO 17025.

As alturas de colocação dos transdutores de compressão (z_2) e aspiração (z_1) são registadas tendo como ponto de referência o piso da sala onde estão instalados os grupos elevatórios, de forma a obter a diferença de altura geométrica entre os pontos de medição de pressão.

Os diâmetros internos das secções de compressão e aspiração devem também ser anotados, para posteriormente serem calculadas as alturas cinemáticas de compressão ($U_2^2/2.g$) e aspiração ($U_1^2/2.g$).

Por fim devem ser contabilizadas as perdas de carga entre os grupos eletrobomba e a secção de medição de pressão na conduta de compressão (p_2) sendo, por isso, essencial o registo de todas as distâncias das condutas existentes entre estes 2 pontos de medição, bem como a existência de válvulas, curvas e contrações ou expansões de diâmetro.

4.3.1.2. Potência absorvida pela bomba (P)

Através da instalação de um analisador de energia para corrente trifásica com recolha de dados sincronizada é possível obter a potência elétrica absorvida pelo motor (P_{gr}). Assim e tendo a eficiência do motor (η_M) fornecido pelo fabricante rapidamente se obtém, por meio da equação (21), a potência absorvida pela bomba (P).

$$P = P_{gr} \times \eta_M \quad (21)$$

De salientar ainda que existe uma incerteza por volta dos 4% neste tipo de equipamento de acordo com os critérios estipulados na norma ISO 9906.

4.3.1.3. Eficiência da bomba (η_H)

A eficiência da bomba pode ser determinada a partir da seguinte fórmula:

$$\eta_H = \frac{Q \times H \times \rho \times g}{P} \quad (22)$$

onde Q representa o caudal volumétrico, H a altura de elevação, ρ a massa volúmica do fluido, g a aceleração da gravidade e P a potência absorvida pela bomba.

Referir ainda que a incerteza associada a eficiência da bomba é de 6.4% de acordo com os critérios estipulados na norma ISO 9906.

4.3.2. PROCEDIMENTO DO TESTE

O teste de eficiência à EEAR alvo de estudo neste trabalho, realizado com base no método convencional descrito no ponto 4.3.1, foi efetuado no dia 10/12/2015 com a participação essencial do Engenheiro Pedro Leite Ferreira da empresa H2OPT pertencente ao grupo Noraqua. Foi utilizado o equipamento de precisão P22P do fabricante ROBERTSON TECHNOLOGY Pty Ltd, fornecido também pela empresa H2OPT.

Para a realização deste teste de eficiência foram utilizados sensores de pressão, analisador de energia e equipamento de recolha e processamento simultâneo de informação. Foram definidos intervalos de 5 segundos para o registo da informação necessária.

Foram instalados dois sensores de pressão, um na secção de aspiração e outro na secção de compressão. O sensor na secção de aspiração foi instalado na respetiva conduta (picagem existente) de aspiração (figura 47) sendo registado uma altura de 1.10 metros ao piso do edifício; o sensor na secção de compressão foi instalado na picagem existente para a instalação do transdutor de pressão na conduta de compressão comum (figura 48), tendo sido medida uma altura de 3.75 metros até ao piso do edifício.



Figura 47 : Sensor de pressão na secção de aspiração.



Figura 48: Sensor de pressão na secção de compressão.

Com o analisador de energia (figura 49) foram registados os valores da potência absorvida pelo motor que, posteriormente, nos permitiu obter a potência absorvida pela bomba através da equação (21) referida no ponto 4.3.1.2.



Figura 49: Analisador de energia.

Os valores dos caudais volumétricos bombeados foram registados através de um medidor de caudal (figura 50) situado na conduta de compressão comum incorporado na estação elevatória. Como já referido foram definidos intervalos de 5 segundos para leitura do caudal durante um período total de 20

segundos, perfazendo assim o registo de 5 caudais para cada conjunto (“set”), tendo sido realizados para cada ensaio 5 “sets”.



Figura 50: Medidor de caudal

O teste de eficiência foi realizado a 3 dos 4 grupos eletrobomba funcionando de forma individual, tendo também sido realizado o teste para 2 e 3 grupos eletrobomba em simultâneo. Como referido no ponto 4.2.2 os grupos eletrobomba possuem variadores de velocidade, fazendo estes operar a 43 Hz aquando do funcionamento individual, estando, no entanto, inicialmente previsto trabalharem a 50 Hz. Foi por esta razão então realizado o teste de eficiência para estas duas frequências. Na tabela 4 pode-se constatar o procedimento do teste.

Ensaio	Pos. Válvula de seccionamento	Grupo Funcionamento	Frequência de funcionamento	Instalação dos sensores
1	Aberta	Grupo 1 Isolado	43 Hz	Grupo 1
2	Aberta	Grupo 1 Isolado	50 Hz	Grupo 1
3	Aberta	Grupo 2 Isolado	43 Hz	Grupo 2
4	Aberta	Grupo 2 Isolado	50 Hz	Grupo 2
5	Aberta	Grupo 4 Isolado	43 Hz	Grupo 4
6	Aberta	Grupo 4 Isolado	50 Hz	Grupo 4
7	Aberta	Grupos 2 e 4 Conjunto	50 Hz	Grupo 4
8	Aberta	Grupos 1, 2 e 4 Conjunto	50 Hz	Grupo 4

Tabela 4: Procedimento do teste de eficiência.

As perdas de carga entre as duas secções de medição de pressão (aspiração individual e compressão comum), foram também contabilizadas. A componente contínua foi calculada tendo como base uma rugosidade de $k = 0.1 \text{ mm}$, uma viscosidade cinemática de $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, e todas as distâncias e diâmetros registados no local. A componente de perda de carga localizada também foi contabilizada e é apresentada na tabela 5.

Troço	Diâmetro (mm)	L (m)	Perda de carga localizada
1	500	0.8	Contração cónica ($\beta < 10^\circ$) $\rightarrow k = 0$
			Válvula de retenção de bola $\rightarrow k = 1.85$
			Válvula de seccionamento de borboleta $\rightarrow k = 0.40$
2	400	2.6	Curva a $90^\circ \rightarrow k = 0.36$
			Expansão cónica (400 x 300) $\rightarrow k = 0.05$
			Expansão cónica (500 x 400) $\rightarrow k = 0.02$
			Bifurcação $\beta = 45^\circ$ (500 x 500) $\rightarrow k = 0.37$
3	500	3.05	Expansão cónica (500 x 700) $\rightarrow k = 0.03$

Tabela 5: Perdas de carga contínuas e localizadas.

De referir ainda que, para a avaliação do funcionamento do sistema elevatório com 2 e 3 grupos eletrobomba em funcionamento simultâneo, foi realizada uma estimativa da potência absorvida por 2 e por 3 motores elétricos, com base na duplicação e triplicação da potência absorvida por um só motor elétrico. Este processo teve de ser adotado visto que o analisador de energia esteve apenas ligado a uma bomba, registando assim só a potência absorvida por um motor. O caudal e a pressão como já referido anteriormente foram medidos na conduta de compressão comum.

4.4. RESULTADOS DO TESTE DE EFICIÊNCIA

A avaliação do desempenho dos grupos elevatórios foi realizada tendo como base de comparação as curvas características originais fornecidas pelo fabricante (ABS) já representadas no ponto 4.2.2.

O BEP (Best Efficiency Point), foi retirado a partir das mesmas curvas e é apresentado na tabela 6.

Características do BEP			
Q (l/s)	H (m)	Pot (kW)	η (%)
400	44	202	85.5

Tabela 6 : Características do BEP para a bomba AFP 3002 50 HZ (impulsor 467 mm).

De salientar ainda que foram considerados os valores de rendimento para o motor e para os variadores fornecidos pelos fabricantes, sendo respetivamente de 94 % e 97%.

Os resultados dos 8 ensaios realizados na EE do Molhe Sul descritos na tabela 4 serão apresentados nos pontos seguintes.

4.4.1. GRUPO Nº 1

Os resultados obtidos para o grupo eletrobomba 1 para as frequências de 43 Hz e 50 Hz estão apresentados respetivamente nas tabelas 7 e 8.

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q(m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor η_M (%)	Efici. Bomba η_H (%)	Efici. Global η_g (%)
1	Aberta	33.07	257.47	926.88	125.47	114.43	83.35	91.20	72.85	66.44
2	Aberta	33.18	260.53	937.92	125.70	114.64	84.62	91.20	73.82	67.32
3	Aberta	33.33	257.23	926.02	125.57	114.52	83.92	91.20	73.29	66.84
4	Aberta	33.49	254.33	915.58	125.15	114.14	83.39	91.20	73.06	66.63
Média	Aberta	33.27	257.39	926.60	125.47	114.43	83.82	91.20	73.25	66.81

Tabela 7: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº1 (43 Hz).

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q(m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor η_M (%)	Efici. Bomba η_H (%)	Efici. Global η_g (%)
1	Aberta	35.64	411.32	1480.74	208.64	190.28	143.47	91.20	75.40	68.77
2	Aberta	36.28	402.27	1448.27	207.39	189.14	142.86	91.20	75.53	68.88
3	Aberta	36.60	397.72	1431.80	207.52	189.25	142.50	91.20	75.30	68.67
4	Aberta	36.66	394.85	1421.45	208.12	189.81	141.69	91.20	74.65	68.08
Média	Aberta	36.30	401.54	1445.54	207.92	189.62	142.63	91.20	75.22	68.60

Tabela 8: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº1 (50 Hz).

A avaliação do desempenho do grupo eletrobomba, representada nas figuras 51 e 52, foi realizada por comparação dos resultados obtidos com as curvas características da bomba e o respetivo BEP. Considera-se o ponto de funcionamento real a média dos pontos obtidos nos testes de eficiência.

De salientar que acordo com a norma EN ISO 9906, Grau 2 poderão existir margens de erro (3.5% em Q e H, 6.4% em η_H e 4% em P) associadas aos resultados obtidos.

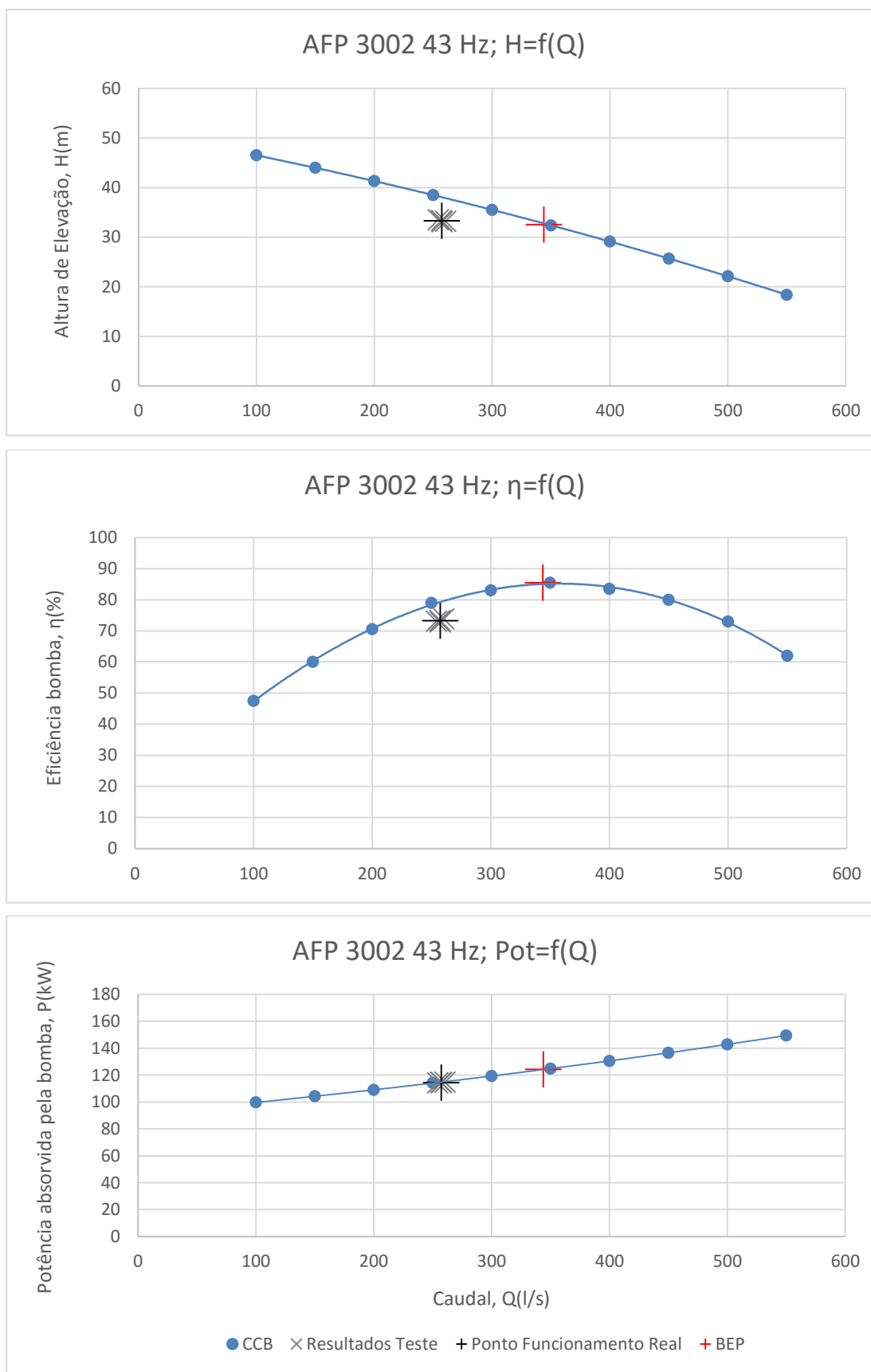


Figura 51: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo N° 1 (43 Hz).

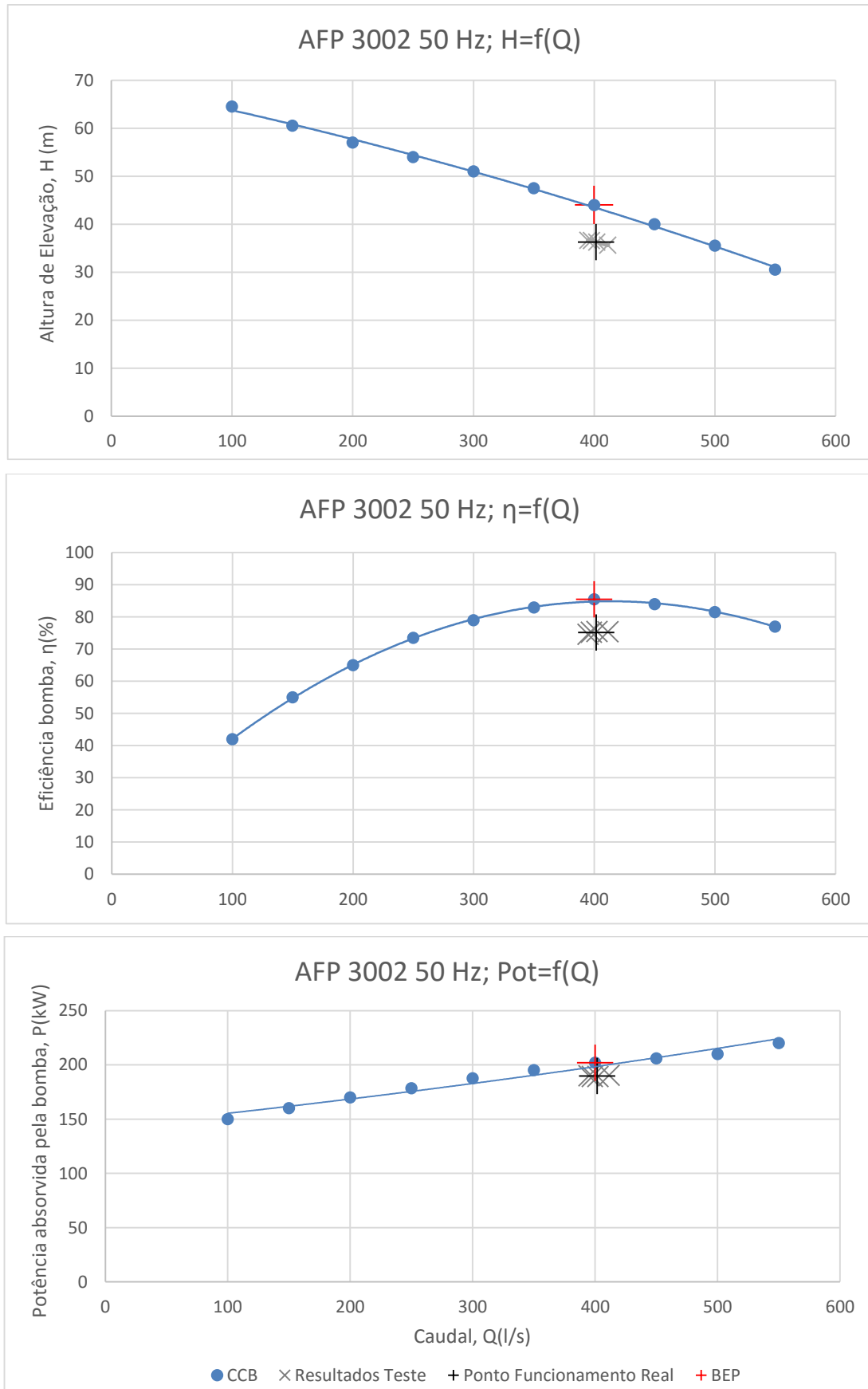


Figura 52: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 1 (50 Hz).

Pela análise dos resultados obtidos verifica-se uma divergência entre os pontos de funcionamento real e as curvas características ($H=f(Q)$), tanto para o ensaio a 43 Hz como para o ensaio a 50 Hz. Para o funcionamento a 43 Hz verifica-se um deslocamento do ponto de funcionamento real para a esquerda, correspondendo a 74% do valor ideal de caudal. A 50 Hz observa-se uma operação próxima do desejado, com o caudal medido a praticamente coincidir com o BEP sendo, no entanto, a altura manométrica inferior.

No que diz respeito à eficiência hidráulica e potência absorvida pela bomba também se verificam discrepâncias entre os valores teóricos (CCB) e reais (teste). Para o ponto de funcionamento a 43 Hz registou-se um valor na ordem dos 73.3% de eficiência e de 75.2% para uma operação das bombas a 50 Hz, correspondendo a uma diminuição de 12.2% e de 10.3 % respetivamente, em comparação ao BEP (85.5%).

4.4.2. GRUPO Nº 2

Nas tabelas 9 e 10 apresentam-se os resultados obtidos para o presente grupo elevatório. A análise de resultados é representada nas figuras 53 e 54.

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q (m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor η_M (%)	Efici. Bomba η_H (%)	Efici. Global η_g (%)
1	Aberta	32.36	235.89	849.20	119.11	108.63	74.73	91.20	68.80	62.74
2	Aberta	32.25	235.51	847.84	119.37	108.86	74.35	91.20	68.30	62.29
3	Aberta	32.21	236.55	851.59	119.43	108.92	74.57	91.20	68.47	62.44
4	Aberta	32.28	235.00	846.01	119.12	108.64	74.27	91.20	68.36	62.35
Média	Aberta	32.28	235.74	848.66	119.26	108.76	74.48	91.20	68.48	62.45

Tabela 9: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº2 (43 Hz).

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q (m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor η_M (%)	Efici. Bomba η_H (%)	Efici. Global η_g (%)
1	Aberta	34.89	357.15	1285.74	188.94	172.31	121.96	91.20	70.78	64.55
2	Aberta	34.53	357.16	1285.78	189.42	172.75	120.72	91.20	69.88	63.73
3	Aberta	34.86	353.06	1271.00	189.34	172.68	120.49	91.20	69.78	63.64
4	Aberta	34.98	351.64	1265.90	189.89	173.18	120.41	91.20	69.53	63.41
5	Aberta	35.14	349.97	1259.91	190.29	173.55	120.38	91.20	69.36	63.26
Média	Aberta	34.88	353.80	1273.66	189.58	172.89	120.79	91.20	69.87	63.72

Tabela 10: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº2 (50 Hz).

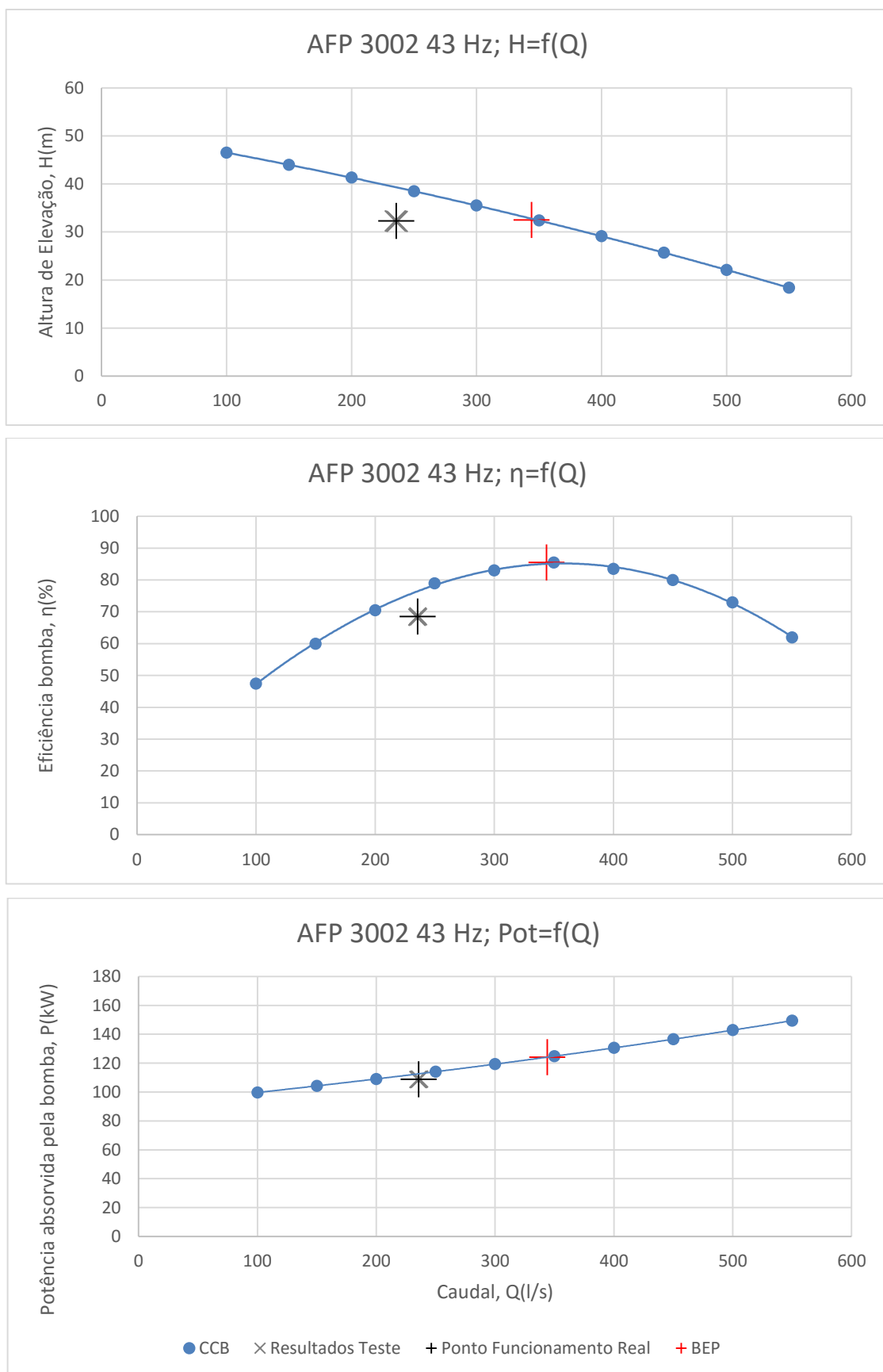


Figura 53: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 2 (43 Hz).

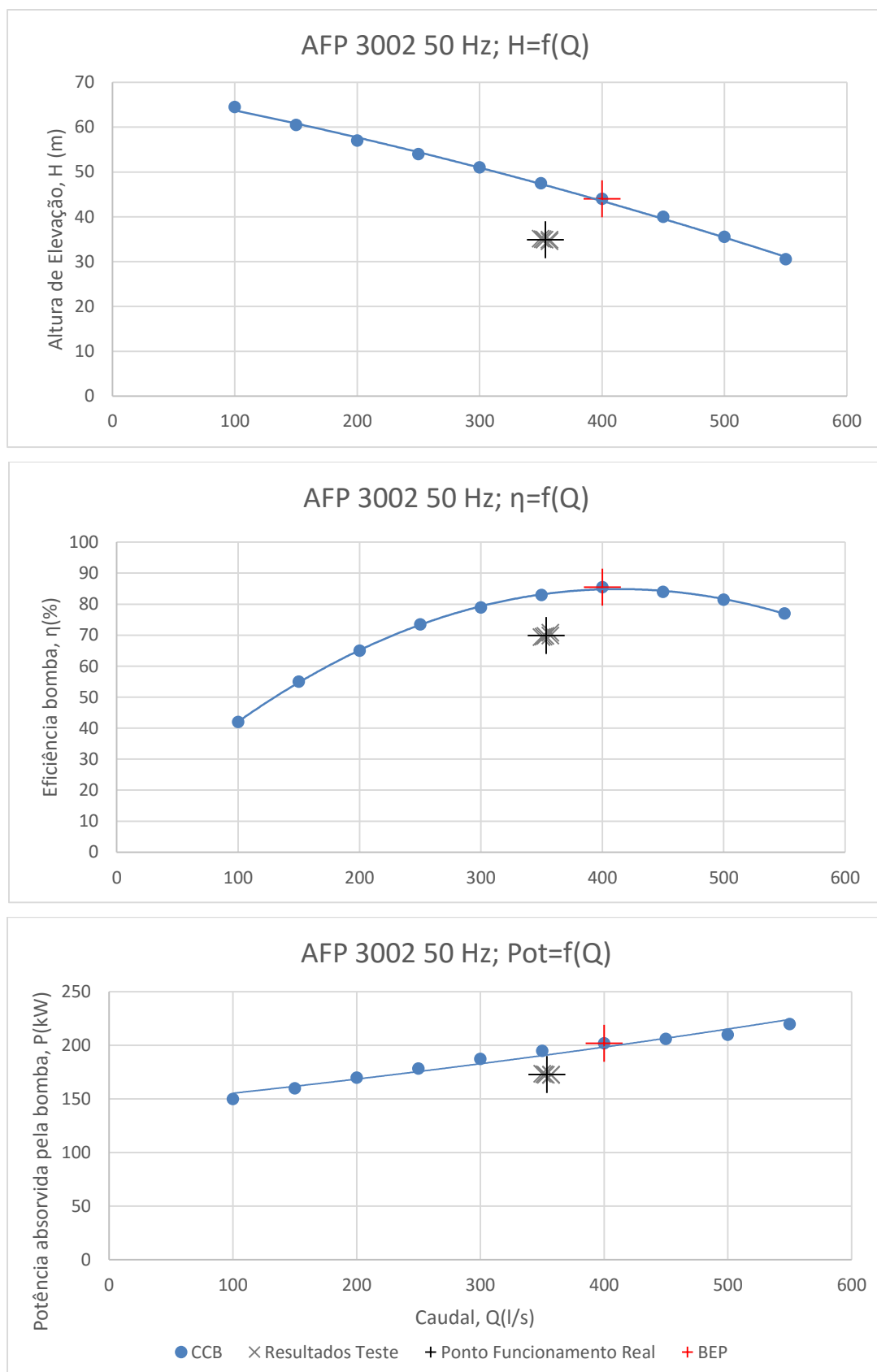


Figura 54: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo N° 2 (50 Hz).

Tal como para o grupo 1, observa-se uma diferença entre os resultados obtidos pelo teste de eficiência e os valores fornecidos pelo fabricante. Para um funcionamento a 43 Hz verifica-se uma eficiência real de 68.5 % representando uma diminuição de 17 % em relação ao ponto ideal de funcionamento, fazendo o grupo operar a 50 Hz nota-se uma redução de 15.6 %, correspondendo assim a reduções de eficiência um pouco superiores ao grupo 1.

Analisando a curva $H=f(Q)$ para este grupo eletrobomba, constata-se um deslocamento do ponto de funcionamento real para a esquerda por comparação com o BEP, tanto para um funcionamento a 43 Hz como para 50 Hz, correspondendo o caudal medido a 68 % e 88 % do caudal para o ponto de máxima eficiência respetivamente.

4.4.3. GRUPO Nº 4

Os resultados obtidos pelo método convencional para o grupo elevatório nº4 estão representados nas tabelas 11 e 12. Nas figuras 55 e 56 pode ser observado o desempenho do presente grupo, por comparação dos resultados obtidos pelo teste de eficiência com respetiva curva característica da bomba.

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q(m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor $\eta_M(\%)$	Efici. Bomba $\eta_H(\%)$	Efici. Global $\eta_g(\%)$
1	Aberta	32.15	241.43	869.14	122.24	111.48	75.96	91.20	68.14	62.14
2	Aberta	32.37	239.11	860.79	121.83	111.11	75.76	91.20	68.18	62.18
3	Aberta	32.17	239.43	861.96	121.66	110.95	75.41	91.20	67.96	61.98
4	Aberta	32.12	239.28	861.42	121.36	110.68	75.25	91.20	67.99	62.01
5	Aberta	32.33	240.97	867.48	122.55	111.76	76.26	91.20	68.23	62.23
Média	Aberta	32.23	240.04	864.16	121.93	111.20	75.73	91.20	68.10	62.11

Tabela 11: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº4 (43 Hz).

Pela análise dos resultados obtidos observa-se uma vez mais uma discrepância entre os valores reais medidos e a curva característica da bomba fornecida pelo fabricante.

Verifica-se uma redução de 17.4 % de eficiência para o funcionamento a 43 Hz. No que diz respeito ao valor de caudal medido, mais uma vez constata-se um deslocamento para a esquerda (figura 52) correspondendo a 69 % do caudal do ponto de máxima eficiência (BEP).

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q(m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor $\eta_M(\%)$	Efici. Bomba $\eta_H(\%)$	Efici. Global $\eta_g(\%)$
1	Aberta	34.76	357.15	1285.74	191.44	174.59	121.53	91.20	69.61	63.49
2	Aberta	35.23	357.16	1285.78	190.76	173.97	123.19	91.20	70.81	64.58
3	Aberta	35.19	353.06	1271.00	191.69	174.82	121.62	91.20	69.57	63.44
4	Aberta	35.36	351.64	1265.90	192.58	175.63	121.71	91.20	69.30	63.20
5	Aberta	35.47	349.97	1259.91	191.94	175.05	121.53	91.20	69.43	63.32
Média	Aberta	35.20	353.80	1273.66	191.68	174.82	121.92	91.20	69.74	63.61

Tabela 12: Resultados do teste de eficiência para o Grupo Nº4 (50 Hz).

Aumentando a frequência para os 50 Hz verificamos um ligeiro aumento da eficiência em comparação com o funcionamento a 43 Hz. Mesmo assim observa-se uma diminuição de 15.8 % em relação ao ponto de funcionamento ideal.

Analisando a curva $H=f(Q)$, (figura 53), verifica-se que o caudal bombeado medido pelo presente grupo eletrobomba representa aproximadamente 88 % do caudal do BEP.

Constata-se assim um funcionamento e um nível de eficiência muito semelhante ao verificado para o grupo 2, tanto para a operação a 43 Hz como para 50 Hz.

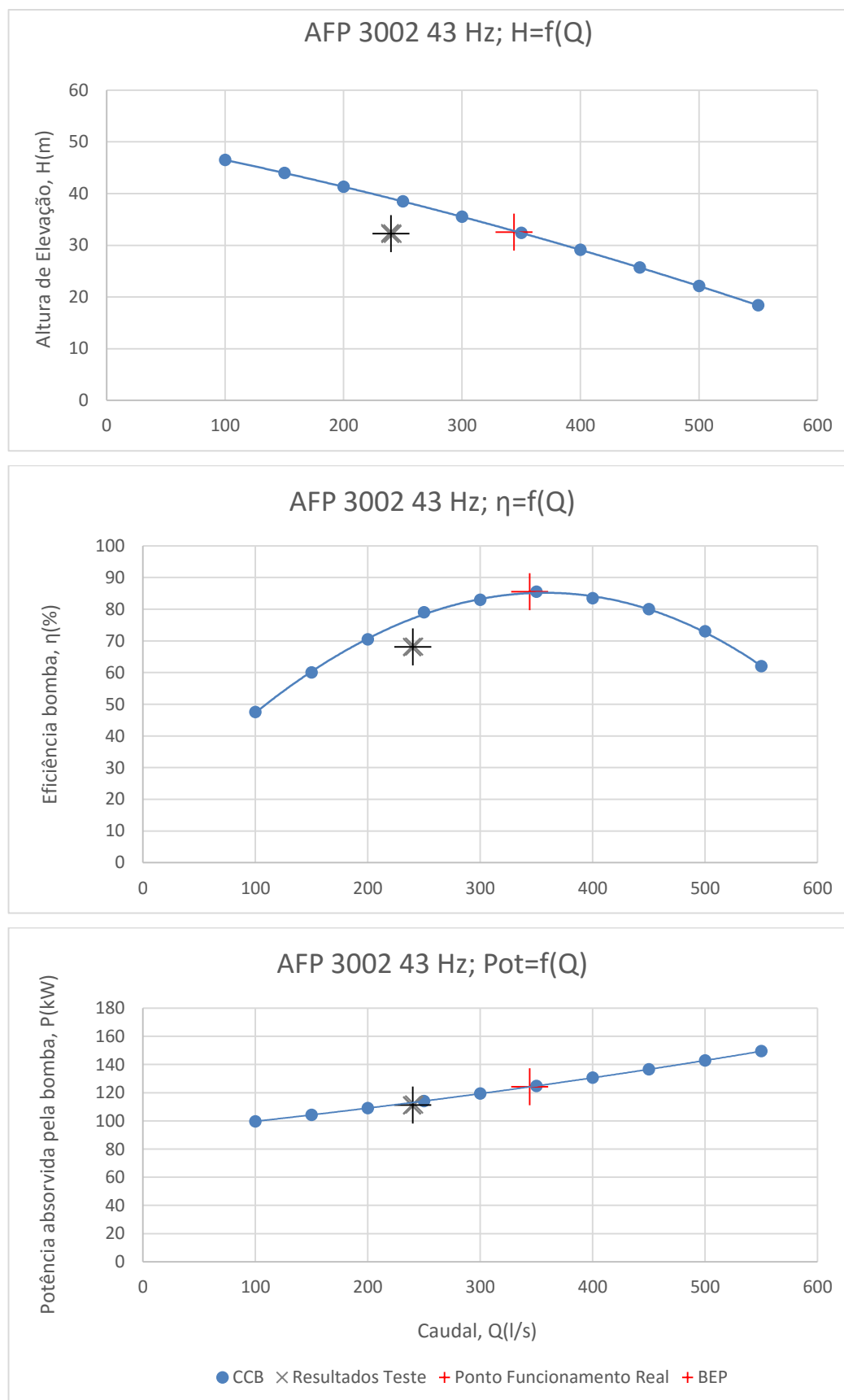


Figura 55: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo Nº 4 (43 Hz).

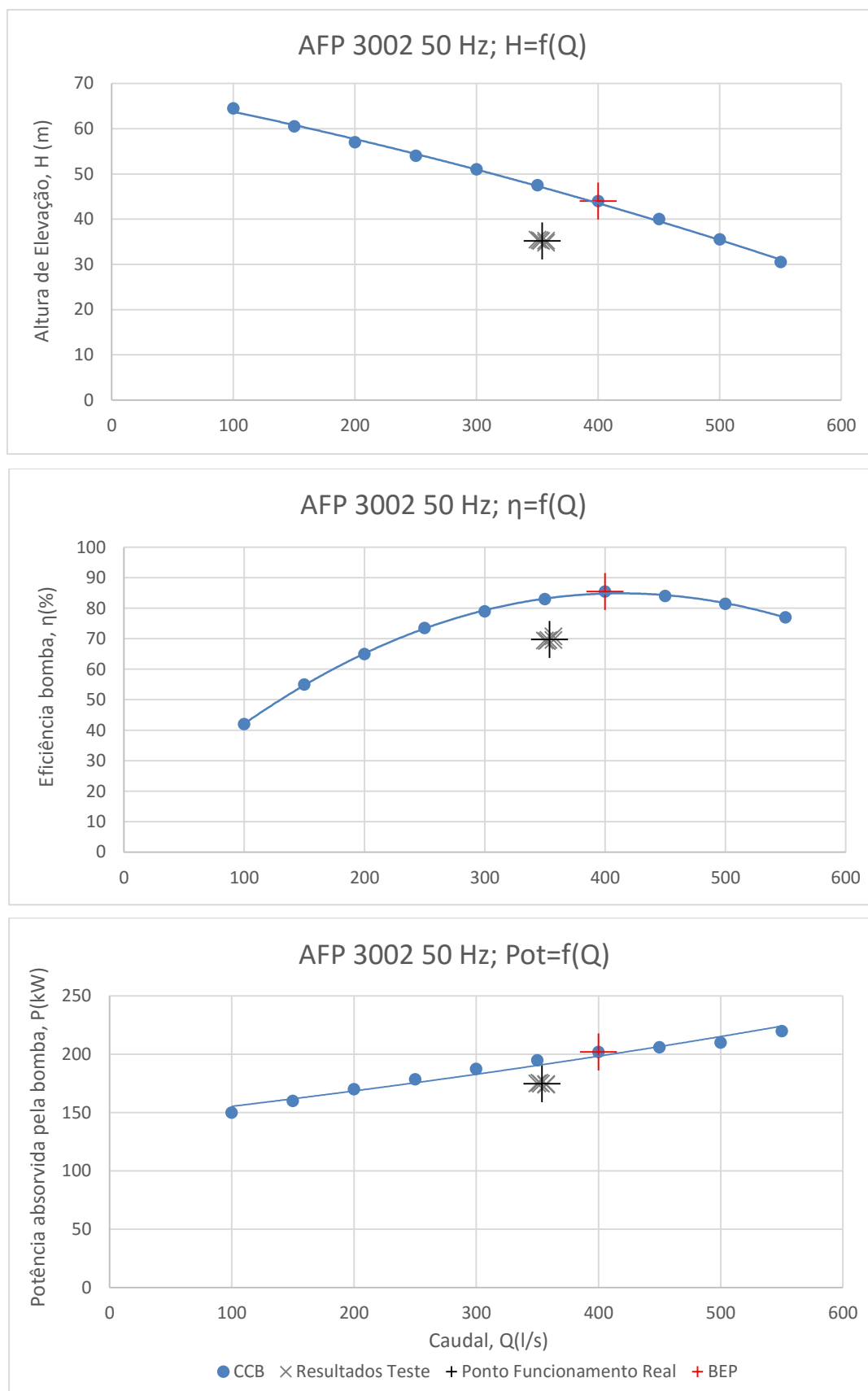


Figura 56: Avaliação dos resultados obtidos para o Grupo N° 4 (50 Hz).

4.4.4. GRUPOS Nº 2 E Nº 4

Como já foi anteriormente referido a caracterização do funcionamento do sistema para dois grupos eletrobomba em funcionamento foi feita tendo em conta uma estimativa da potência absorvida pela bomba, duplicando o valor registado. De referir que, para esta análise, foi como é óbvio considerada a curva característica para 2 bombas em paralelo.

A potência instantânea foi registada para o grupo nº4.

Pontos de avaliação	Potência elétrica absorvida (kW)
1	191.34
2	190.82
3	190.98
4	191.38
5	190.80

Tabela 13: Registo da potência absorvida pelo grupo nº 4.

De seguida, e à semelhança dos pontos anteriores, na tabela 14 estão representados os valores obtidos pelo método convencional para o funcionamento em conjunto dos grupos eletrobomba nº2 e nº4.

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q (m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor η_M (%)	Efici. Bomba η_H (%)	Efici. Global η_g (%)
1	Aberta	40.01	627.11	2257.6	382.68	349.00	245.58	91.20	70.37	64.18
2	Aberta	40.35	620.17	2232.6	381.64	348.06	244.94	91.20	70.38	64.19
3	Aberta	40.69	619.14	2228.9	381.96	348.35	246.64	91.20	70.80	64.57
4	Aberta	40.80	607.17	2185.8	382.76	349.08	242.50	91.20	69.47	63.36
5	Aberta	41.00	599.08	2156.7	381.60	348.02	240.46	91.20	69.09	63.01
Média	Aberta	40.57	614.53	2212.3	382.13	348.50	244.02	91.20	70.02	63.86

Tabela 14: Resultados do teste de eficiência para funcionamento em paralelo dos Grupos Nº2 e Nº4.

Na figura 57 pode-se observar a comparação dos resultados obtidos com o ponto de máxima eficiência.

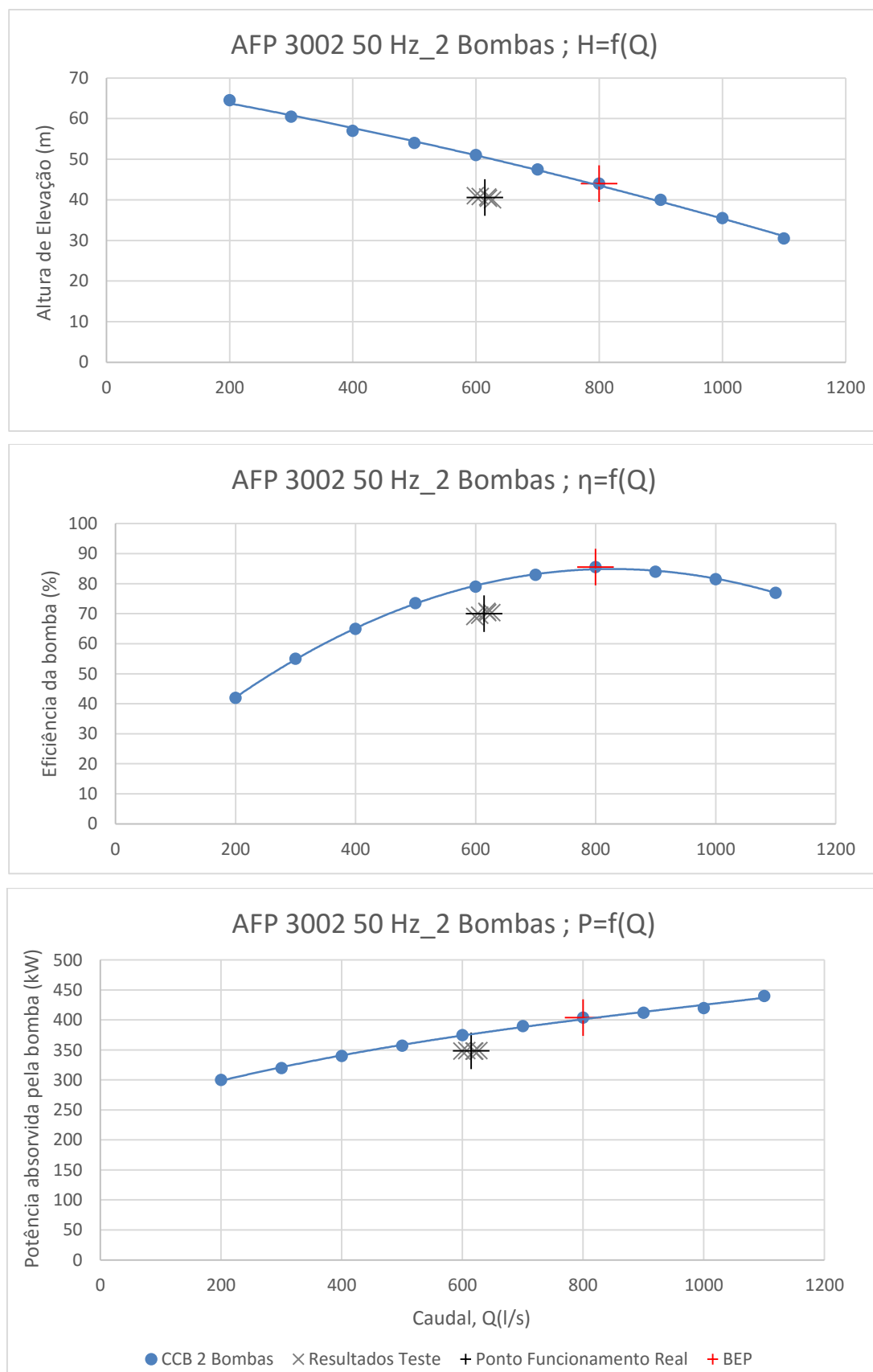


Figura 57: Avaliação de resultados para funcionamento em paralelo dos grupos nº2 e nº4.

Pela análise dos gráficos e dos resultados obtidos verificamos uma redução de eficiência na ordem dos 15.5 % relativamente ao BEP.

Observa-se mais uma vez uma deslocação para a esquerda do ponto real de funcionamento comparativamente ao BEP, registando-se um caudal medido de 77% do caudal do ponto de máxima eficiência.

4.4.5. GRUPOS Nº1, Nº2 E Nº 4

À semelhança da análise anterior, a caracterização do funcionamento de 3 grupos eletrobomba em conjunto, teve como base uma estimativa da potência absorvida, triplicando neste caso a potência absorvida registada por um grupo eletrobomba. Mais uma vez foi a potência foi registada para grupo nº4.

Pontos de avaliação	Potência elétrica absorvida (kW)
1	189.35
2	189.32
3	188.41
4	188.30
5	188.92

Tabela 15: Registo da potência absorvida pelo grupo nº 4.

Na tabela 16 e na figura 58 são apresentados sistematizadamente os resultados obtidos pelo método convencional para o funcionamento em paralelo dos 3 grupos eletrobomba acima mencionados.

Pontos de avaliação	Pos. Válvula seccion.	Altura de elevação H (m)	Caudal Volum. Q (l/s)	Caudal Volum. Q(m³/h)	Potência Elétrica Pgr (kW)	Potência Bomba P (kW)	Potência Hidrául. Pu (kW)	Efici. Motor $\eta_M(\%)$	Efici. Bomba $\eta_H(\%)$	Efici. Global $\eta_g(\%)$
1	Aberta	45.69	788.78	2839.6	568.05	518.06	352.77	91.20	68.09	62.10
2	Aberta	45.89	782.67	2817.6	567.96	517.98	351.57	91.20	67.88	61.90
3	Aberta	46.12	769.41	2769.9	565.23	515.49	347.37	91.20	67.39	61.46
4	Aberta	46.26	761.82	2742.5	564.90	515.19	345.00	91.20	66.97	61.07
5	Aberta	46.22	757.92	2728.6	566.76	516.89	342.93	91.20	66.35	60.51
Média	Aberta	46.04	772.12	2779.6	566.58	516.72	347.93	91.20	67.33	61.41

Tabela 16: Resultados do teste de eficiência para funcionamento em paralelo dos Grupos Nº1, Nº2 e Nº4.

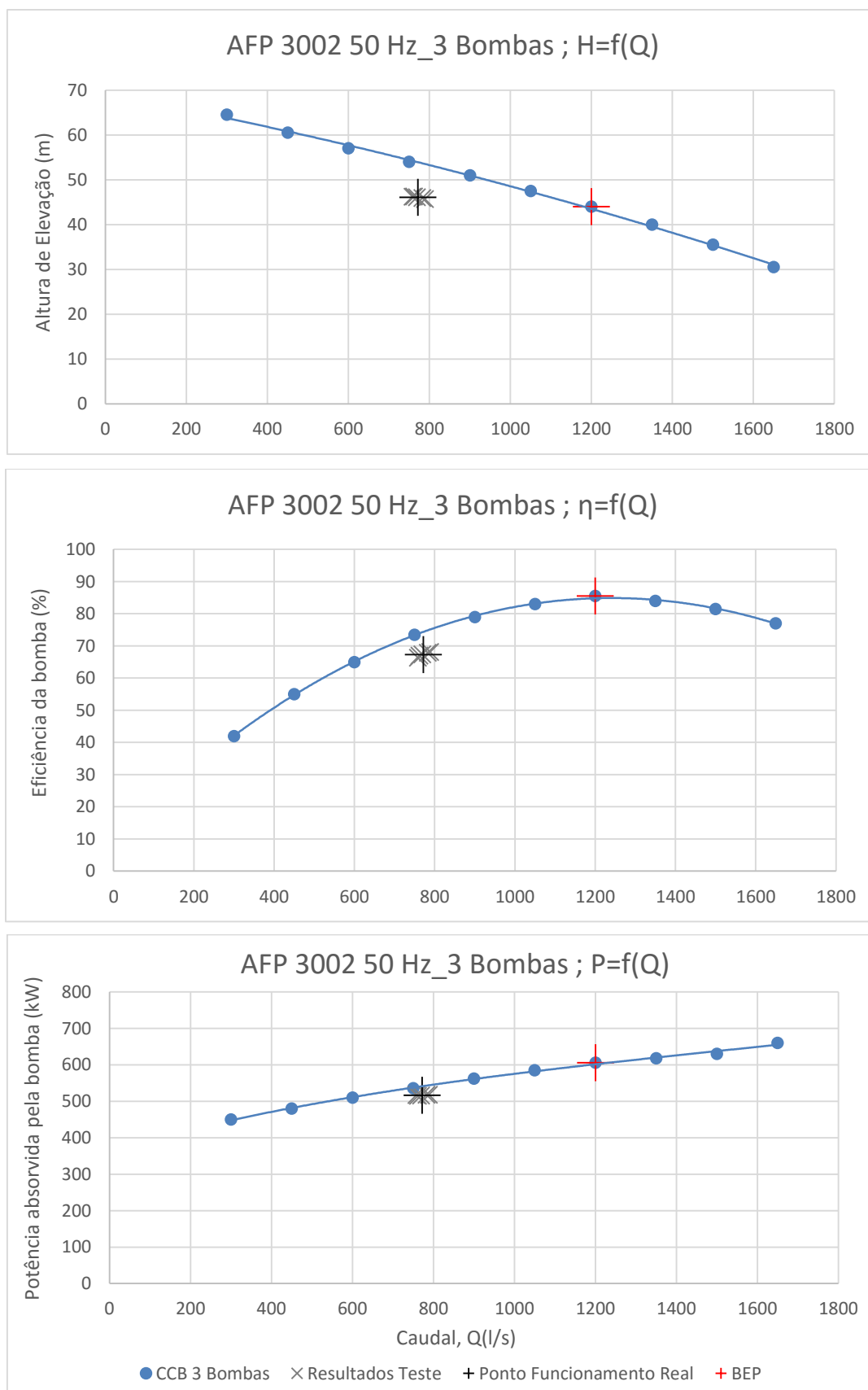


Figura 58: Avaliação de resultados para funcionamento em paralelo dos grupos nº1, nº2 e nº4.

Para o funcionamento em paralelo dos 3 grupos, verificamos comparativamente com os outros ensaios um acentuar do deslocamento do ponto real de funcionamento para a esquerda, o que já seria de esperar pois neste tipo de funcionamento o caudal debitado por cada bomba individualmente é menor devido ao consequente aumento de perdas de carga na conduta, reduzindo assim a eficiência do conjunto. Desta forma registou-se uma eficiência de 67.3 %, representando uma diminuição de 18.2 % relativamente ao BEP, correspondendo assim à menor eficiência hidráulica de todos os ensaios realizados.

Por outro lado, verifica-se também uma diminuição do caudal medido comparativamente ao BEP, correspondendo a uma capacidade de 64.3% relativamente a este.

4.4.6. CONCLUSÕES

Antes da apresentação dos resultados globais dos testes de eficiência (tabela 17) e respetiva avaliação, importa relembrar, que a mesma foi realizada com base nos pontos de funcionamento real (Q, H, Rendimento e Potência) medidos. A eficiência obtida é comparada com o ponto de máxima eficiência (BEP) para os grupos eletrobomba presentes na EE estudada.

De salientar ainda que, para bombas centrífugas, e de acordo com o recomendado pelo ANSI/HI 9.6.3-1997, o ponto de funcionamento real não deverá funcionar fora da região entre 70 a 120 % do caudal do BEP.

EE	Grupo	Q (l/s)	H (m)	P (kW)	η real (%)	η BEP (%)	$\Delta \eta$	% Q BEP
Molhe Sul	Nº1 (43 Hz)	257.4	33.3	114.4	73.3	85.5	-12.2%	74.8%
	Nº1 (50 Hz)	401.5	36.3	189.6	75.2		-10.3%	100.4%
	Média Nº1	329.5	34.8	152.0	74.3		-11.3%	87.6%
	Nº2 (43 Hz)	235.7	32.3	108.8	68.5		-17.0%	68.5%
	Nº2 (50 Hz)	353.8	34.9	172.9	69.9		-15.6%	88.5%
	Média Nº2	294.8	33.6	140.8	69.2		-16.3%	78.5%
	Nº4 (43 Hz)	240.0	32.2	111.2	68.1		-17.4%	69.8%
	Nº4 (50 Hz)	353.8	35.2	174.8	69.7		-15.8%	88.5%
	Média Nº4	296.9	33.7	143.0	68.9		-16.6%	79.1%
	Média 1 Grupo (43 Hz)	244.4	32.6	111.5	70.0		-15.5%	71.0%
	Média 1 Grupo (50 Hz)	369.7	35.5	179.1	71.6		-13.9%	92.4%
	Nº2 + Nº4	614.5	40.6	348.5	70.0		-15.5%	76.8%
	Nº1 + Nº2 + Nº4	772.1	46.0	516.7	67.3		-18.2%	64.3%

Tabela 17: Resultados globais dos ensaios realizados para o teste de eficiência pelo método convencional.

Analisando a tabela 17, constatamos que o grupo nº1 apresenta os melhores níveis de eficiência energética dos 3 grupos testados, com uma redução média de 11.3% de rendimento comparativamente com BEP. Os grupos nº2 e nº4 exibem resultados bastantes similares ao nível da eficiência com reduções de rendimento na ordem dos 16%.

Verifica-se também um ligeiro aumento de eficiência energética para o funcionamento a 50 Hz, apesar da situação normal de funcionamento isolado ser a 43 Hz, o que nos poderá levar a considerar um reajuste na gama de frequências de funcionamento programadas para os VFD instalados, uma vez que

observa em alguns casos percentagens de caudal inferiores aos valores ideais (70 a 120 % do BEP). O afastamento deste intervalo poderá levar a vibrações excessivas, possibilidade de existência de fenómenos de recirculação e até mesmo a uma degradação acelerada do impulsor.

Por outro lado, no funcionamento conjunto de 2 e 3 grupos em paralelo verificamos que para a operação de 2 grupos em simultâneo, os resultados obtidos foram aceitáveis com a percentagem de caudal elevado dentro do intervalo desejado, e rendimento a sofrer uma diminuição de 15.5 % em relação ao BEP. No entanto o funcionamento de 3 bombas em conjunto, corresponde ao menor rendimento de todos os pontos de funcionamento testados com uma diminuição de 18.2 % relativamente ao BEP, e um ponto de funcionamento com 64.3% de capacidade relativamente ao caudal do ponto máximo de eficiência, estando assim fora do intervalo recomendado.

Refira-se ainda que esta perda de eficiência dos grupos eletrobomba está associada a duas componentes distintas: $\Delta\eta_{BEP}$ e $\Delta\eta_{Deg}$. O $\Delta\eta_{BEP}$ corresponde à percentagem de redução de rendimento relativa ao afastamento do ponto de funcionamento real em relação ao BEP; o $\Delta\eta_{Deg}$ representa a diminuição de eficiência relativa à degradação dos grupos dos grupos para o caudal registado, face às características originais do fabricante (figura 59).

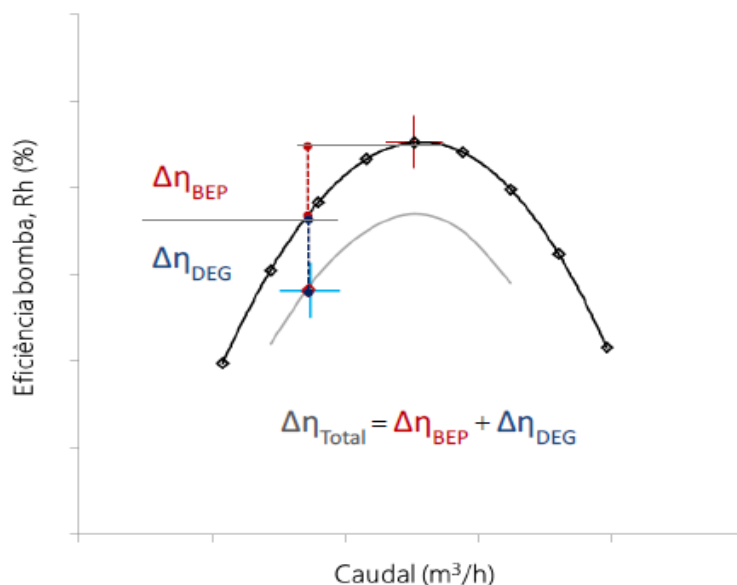


Figura 59: Distinção das componentes responsáveis pela redução de eficiência em sistemas elevatórios (Vivas, 2016).

Esta análise tem como objetivo diferenciar as ineficiências devido a eventuais degradações dos grupos eletrobomba, das ineficiências causadas por um funcionamento afastado do BEP (entre os 70 e os 120% do caudal do BEP).

Assim para a realização desta distinção foram seguidos os seguintes passos:

- Para cada ponto de funcionamento real, dos 8 ensaios realizados, introduzir o caudal obtido na equação da curva característica dos rendimentos da bomba e calcular o rendimento expectável da bomba para esse caudal;
- A diferença entre o rendimento expectável para esse caudal e o rendimento realmente obtido pelo teste de eficiência representa a ineficiência devido a degradação do grupo ($\Delta\eta_{Deg}$);

- A diferença entre o $\Delta\eta_{\text{Total}}$ e $\Delta\eta_{\text{Deg}}$ será a diminuição de eficiência relativa ao afastamento do BEP ($\Delta\eta_{\text{BEP}}$).

Na tabela 18 podemos então observar esta diferenciação para cada grupo eletrobomba.

EE Molhe Sul					
Grupo	Q (l/s)	η BEP (%)	$\Delta \eta$ Total (%)	$\Delta \eta$ (%)	
				$\Delta \eta$ BEP	$\Delta \eta$ Deg.
Nº1 (43 Hz)	257.4	85.5	12.2	6.3	5.9
Nº2 (43 Hz)	235.7		17.0	9.1	7.9
Nº4 (43 Hz)	240.0		17.4	8.5	8.9
Nº1 (50 Hz)	401.5		10.3	0.7	9.6
Nº2 (50 Hz)	353.8		15.6	2.1	13.5
Nº4 (50 Hz)	353.8		15.8	2.1	13.7
Nº2 + Nº4	614.5		15.5	5.4	10.1
Nº1 + Nº2 + Nº4	772.1		18.2	11	7.2

Tabela 18: Avaliação da redução de eficiência segundo as suas duas componentes.

Conclui-se assim que para o funcionamento atual dos grupos (43 Hz), a parcela mais significativa, tanto para o grupo nº1 como para o nº2, é o afastamento relativamente ao BEP, o que se compreende, pois, os grupos originalmente foram instalados para trabalharem a 50 Hz, e a instalação dos VFD provoca um decréscimo do caudal elevado. No grupo nº4 observa-se, ao contrário dos grupos 1 e 2, uma maior preponderância da parcela referente à degradação, se bem que não muito relevante, o que indica um maior desgaste neste grupo comparativamente aos outros dois.

No funcionamento em paralelo dos grupos nº 2 e 4, verificou-se uma percentagem significativa de redução de eficiência relativa ao estado dos grupos, o que é explicado em parte por terem sido testados em conjunto os 2 grupos em pior estado. Se, por exemplo, tivessem sido testados os grupo nº 1 e 2 em funcionamento simultâneo, esta parcela seria de certeza mais reduzida.

Com 3 grupos trabalhar em paralelo, registou-se uma maior preponderância do funcionamento afastado do BEP, o que seria de esperar pois existe neste tipo de funcionamento uma redução dos caudais elevados individualmente por cada bomba, e que corrobora com o anteriormente concluído (maior afastamento do intervalo recomendado para o funcionamento deste tipo de equipamentos).

4.5. CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO

Com a obtenção dos diferentes pontos de funcionamento para cada grupo isolado, tanto para 43 Hz como para 50 Hz, assim como para o funcionamento conjunto de dois e três grupos em paralelo, foi possível

traçar a curva característica aproximada da instalação. Pretende-se desta forma analisar as variações das perdas de carga em função do caudal e altura elevados.

A definição da CCI teve como base a avaliação do desnível geométrico e as diferentes alturas de elevação para os respetivos caudais, não desprezando os níveis de água no poço de bombagem. Como já foi acima referido, a CCI determinada é uma aproximação, visto que os caudais e as respetivas perdas de carga poderão possuir diferenças nas condutas individuais de compressão, nas situações de vários grupos em funcionamento conjunto, apesar de serem de pequena relevância.

4.5.1. DESNÍVEL GEOMÉTRICO

A determinação do desnível geométrico foi realizada por meio da observação da pressão na conduta de compressão em regime hidrostático. Não obstante é preciso ter em conta que este desnível é definido tendo como referencia a cota de soleira do poço de bombagem, pelo que é necessário considerar a diferença de altura entre o ponto de tomada de pressão na conduta de compressão e o ponto de medição de pressão na conduta de aspiração.

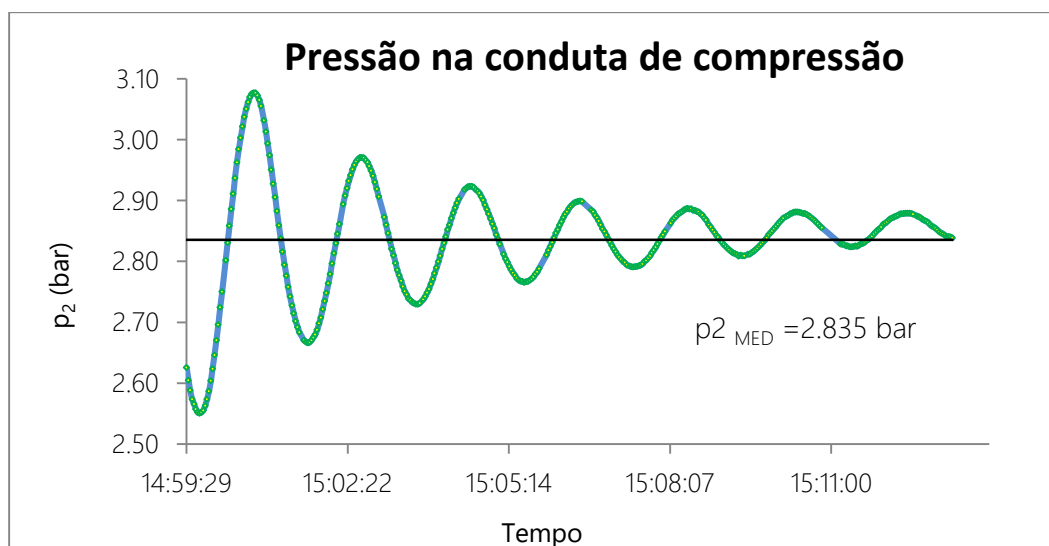


Figura 60: Registo da pressão na conduta de compressão, para aferição do desnível geométrico.

Pela observação da figura 60, verificamos que o valor medio de pressão registado foi de 2.835 bar, correspondendo assim a uma altura aproximada de 28.90 m. Assim somando a este valor a diferença entre a cota de soleira e ponto de medição de pressão na conduta de compressão (3.75 m) e a cota de soleira e o ponto de medição de pressão na conduta de aspiração (1.10 m), obtemos um valor de 31.55 m para o desnível geométrico.

4.5.2. CURVA CARACTERÍSTICA DA INSTALAÇÃO APROXIMADA

Por forma a traçar a CCI aproximada, foram considerados oito pontos de funcionamento real, correspondendo cada um à média dos pontos obtidos nos oito ensaios realizados e já explanados na tabela 4. De seguida, na tabela 19, apresentam-se então os dados relativos aos pontos de funcionamento considerados para a obtenção da curva real do sistema.

Pontos	Caudal Volumétrico		Carga		Desnível geométrico H _{geo} (m)	Perda de carga ΔH (m)
	Q (l/s)	Q (m ³ /h)	E1 (m)	E2 (m)		
1	257.37	926.54	2.81	35.42	31.55	3.87
2	401.54	1445.54	2.81	37.48	31.55	5.93
3	235.74	848.66	3.46	35.17	31.55	3.62
4	353.79	1273.66	3.22	36.84	31.55	5.29
5	240.04	864.16	3.56	35.21	31.55	3.66
6	353.79	1273.66	3.23	36.84	31.55	5.29
7	614.53	2212.32	3.20	42.72	31.55	11.17
8	772.12	2779.62	3.03	48.40	31.55	16.85

Tabela 19: Pontos de funcionamento considerados para determinação da CCI.

Foram ainda consideradas as seguintes condições para o traçado da CCI:

- O nível do poço foi definido com base na medição de pressão na conduta de aspiração e considerando a média desses valores para a totalidade de cada ensaio;
- As perdas de carga contínuas e localizadas entre os pontos de medição de pressão, não foram desprezadas e estão apresentadas na tabela 5;
- Foram desprezadas as perdas de carga, contínuas e localizadas, entre a boca de aspiração e o ponto de medição de pressão a montante na conduta de aspiração;
- Por fim a CCI aproximada foi obtida através de uma regressão polinomial de 2º grau.

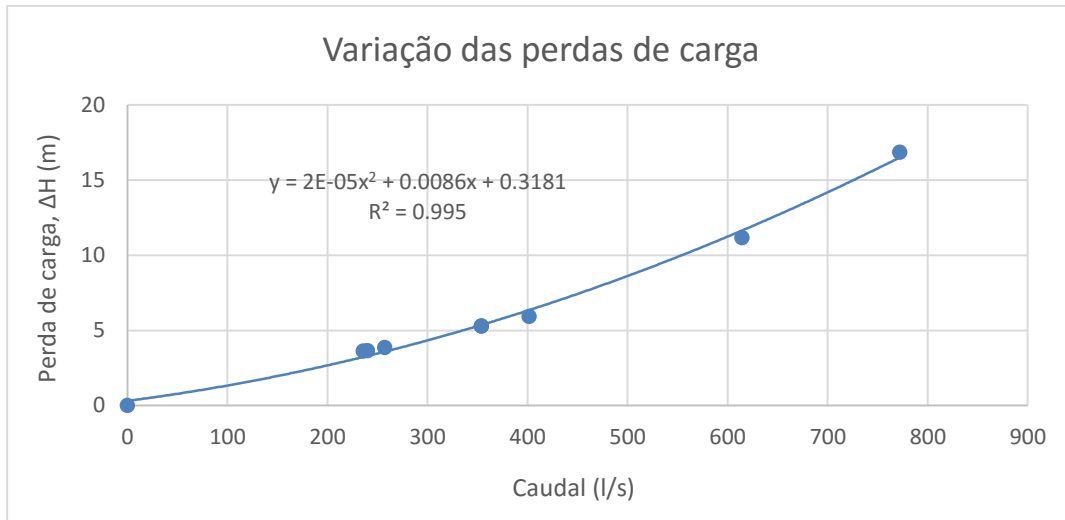


Figura 61: Variação das perdas de carga em função do caudal elevado.

Para o correto traçado da curva real do sistema é necessário, então, ter em conta os níveis de intervalo de operação do poço de bombagem. Uma vez que não existe nesta estação elevatória um medidor de nível ultrassônico no poço de bombagem, foi admitido um intervalo de operação entre os 2 e os 4 metros de altura de água, tendo como base a informação disponibilizada pelo operador presente aquando da realização do teste de eficiência aos grupos eletrobomba. De notar que estes valores têm como referência o piso da estação elevatória e não a cota de fundo do poço de bombagem.

Apresenta-se assim na figura 62 a aproximação da curva característica da instalação, para um nível mínimo de 2 metros e um máximo de 4 metros.

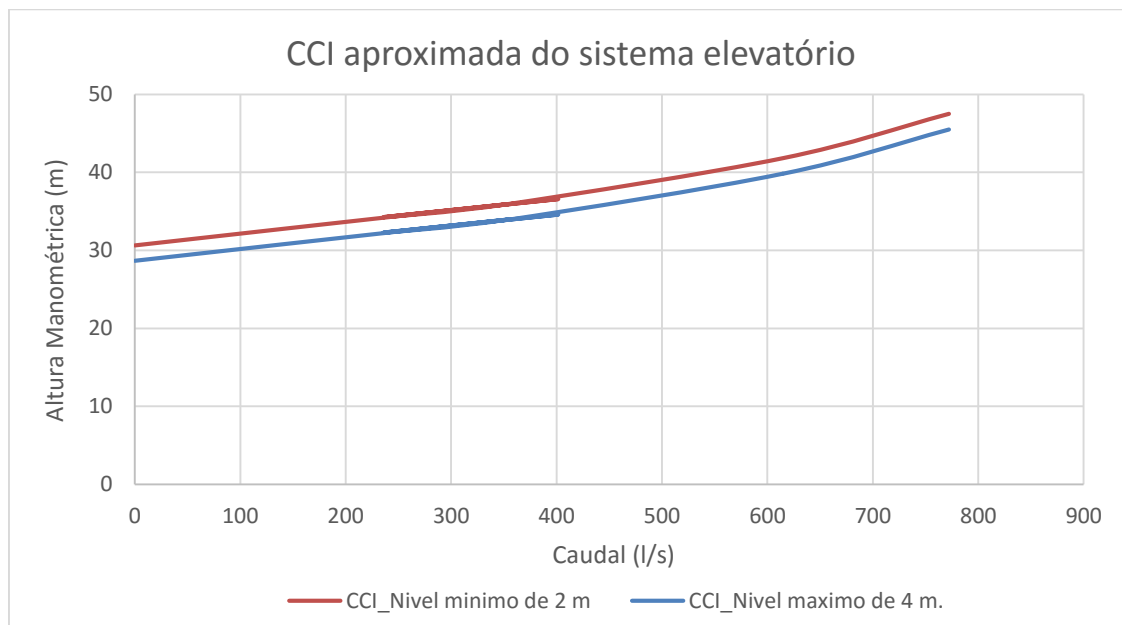


Figura 62: Curva característica aproximada da instalação.

4.5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por forma a analisar a adequação dos grupos eletrobomba face às necessidades da instalação, intersectou-se as CCI obtidas para o nível máximo e mínimo do poço de bombagem com a curva característica das bombas instaladas na estação elevatória.

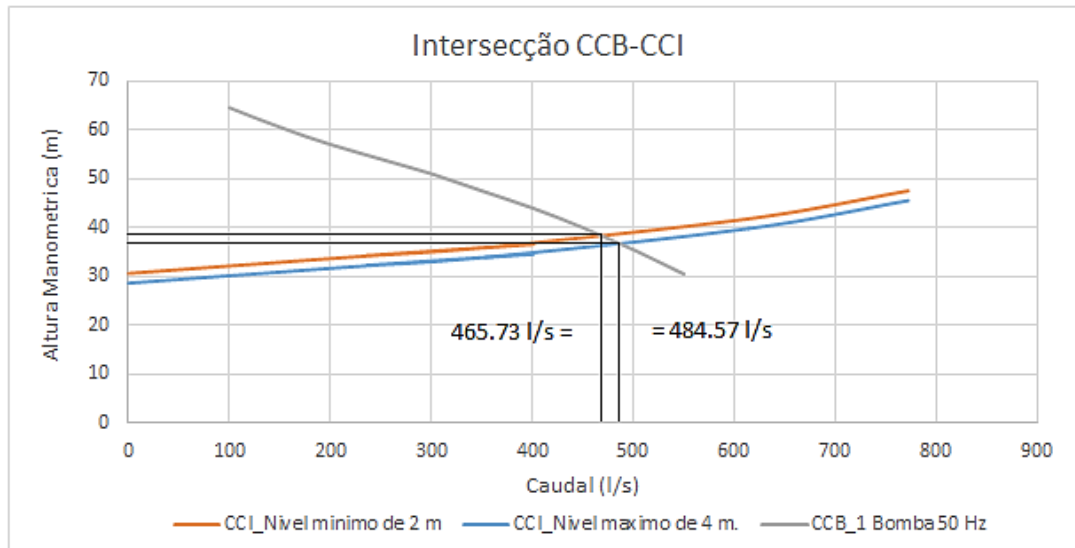


Figura 63: Intersecção da CCI com a CCB.

Pela análise do gráfico verificamos que a intersecção da CCB com a CCI ocorre, para valores de caudal na ordem dos 466 l/s para a curva característica aproximada do sistema no nível mínimo do poço e de 485 l/s para a curva característica aproximada do sistema no nível máximo do poço de bombagem.

Tendo em conta os pontos de funcionamento reais obtidos (na ordem dos 350-400 l/s para funcionamento a 50 Hz) pelo teste de eficiência efetuado, apesar das bombas já registarem algum desgaste (especialmente os grupos 2 e 4), e os valores definidos no projeto de execução (caudal de dimensionamento de 270 l/s a elevar por cada bomba), rapidamente constatamos que os grupos eletrobomba escolhidos estão sobredimensionados para a curva real da instalação.

4.6. ANÁLISE DE EXISTÊNCIA DE CAVITAÇÃO

Qualquer fluido no estado líquido possui uma temperatura de vaporização. No entanto esta temperatura será diferente consoante a pressão existente. Por exemplo a temperatura de vaporização da água, à pressão atmosférica é de aproximadamente 100 °C. Contudo a uma pressão inferior, a temperatura de vaporização também irá diminuir.

Por forma a aumentar a velocidade do fluido as bombas transmitem a este, energia mecânica, implicando uma inevitável redução de pressão no impulsor. Quando esta pressão mínima for igual ou inferior à pressão de vaporização do fluido, ocorrerá o fenómeno designado por cavitação (formação de bolhas de vapor), o que poderá levar a uma degradação dos impulsores. Existe, no entanto, um parâmetro que nos permite avaliar as condições de aspiração e ajudar a fazer uma previsão da margem de segurança contra os problemas da cavitação, o NPSH.

Tendo sido realizada a medição de pressão na conduta de aspiração durante o teste de eficiência, de cada grupo eletrobomba, foi possível avaliar a eventual existência do fenómeno de cavitação, através do cálculo do NPSH disponível, de acordo com a seguinte expressão:

$$NPSH_d = H_1 - Z_D + \frac{P_{atm} - p_v}{\rho g} \quad (23)$$

Onde,

- H_1 (m) – carga hidráulica na secção de avaliação, medida em relação ao chão;
- Z_D (m) – diferença entre o eixo da bomba e o chão;
- P_{atm} (Pa) – pressão atmosférica;
- p_v (Pa) – tensão de vapor;
- ρ (kg/m³) – massa volúmica da água;
- g (m/s²) – aceleração da gravidade.

Por outro lado, os fabricantes definem experimentalmente o $NPSH_r$, que é o valor de NPSH requerido para um determinado valor de caudal do ponto de funcionamento, por forma a evitar a existência o fenómeno de cavitação. Assim a curva de $NPSH_r$ em função do caudal elevado dos grupos eletrobomba instalados, fornecida pelo fabricante, apresenta-se na figura 64.

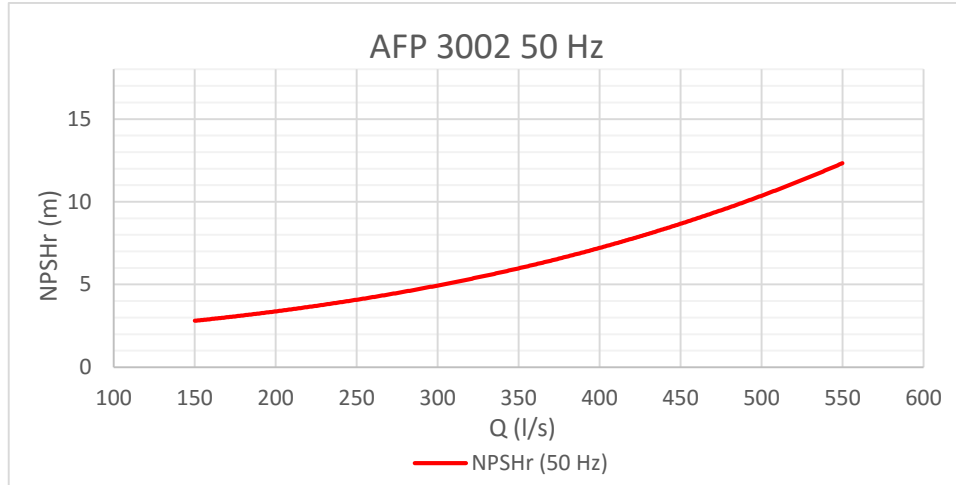


Figura 64: Valores de NPSHr em função do caudal.

Posto isto, foi então analisada a possível existência de cavitação, comparando os valores de $NPSH_d$ com os valores de $NPSH_r$. De referir que esta análise deve considerar uma margem de segurança no valor de 1.3 m, segundo o recomendado pelo ANSI/HI 9.6.1 – 1998. Esta margem pretende representar possíveis imprecisões nos valores das perdas de carga contínuas e localizadas na tubagem de aspiração, assim como valores de $NPSH_r$ maiores do que os apresentados pelos fabricantes, pois o ponto de início de cavitação é difícil de identificar. Desta forma para a não ocorrência de cavitação deve ser respeitada a seguinte expressão:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + \text{Margem de Segurança} \quad (24)$$

Os valores de Z_1 e Z_D foram medidos no local, e podem ser observados na figura 65.

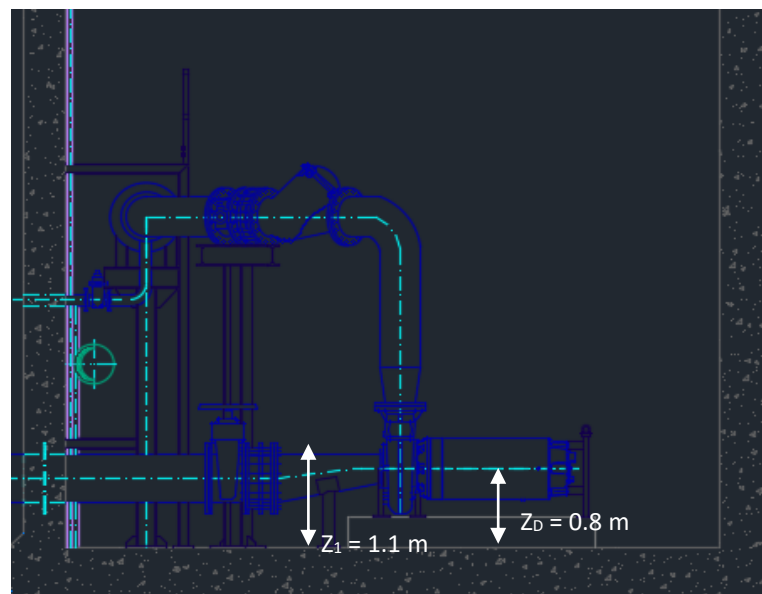


Figura 65: Corte da câmara dos grupos elevatórios e identificação das alturas Z_1 e Z_D .

Assim foram admitidos as seguintes condições para o cálculo do $NPSH_r$ e $NPSH_d$:

- Os valores de P_1 e $U_1^2/2g$ foram obtidos considerando um valor médio da totalidade de cada ensaio para cada grupo eletrobomba;
- Z_D e Z_1 (figura 65) foram medidos no local do ensaio;
- H_1 é a carga hidráulica da secção, incluindo a altura cinética ($U_1^2/2g$);
- Foi considerado um valor de 2000 Pa para a tensão de vapor do fluido, pois admitiu-se uma temperatura entre os 15 - 20 °C;
- O $NPSH_r$ foi obtido pela equação da curva da figura 64, para o caudal registado para cada um dos pontos de funcionamento real;
- Para a análise de duas e três bombas em paralelo, foi feita uma divisão do caudal registado por 2 e 3 respetivamente, fazendo assim uma estimativa do caudal debitado individualmente por cada grupo eletrobomba.

Parâmetro	EE Molhe Sul							
	B1 (43 Hz)	B1 (50 Hz)	B2 (43 Hz)	B2 (50 Hz)	B4 (43 Hz)	B4 (50 Hz)	2B (50 Hz)	3B (50 Hz)
Q (l/s)	257.37	401.54	235.74	353.79	240.04	353.79	614.53	772.12
P_1 (bar)	0.1593	0.1474	0.2238	0.1919	0.2345	0.1236	0.194	0.1806
Z_1 (m)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
$U_1^2/2g$ (m)	0.0876	0.2133	0.0735	0.1656	0.0762	0.1656	0.1249	0.0876
H_1 (m)	2.8120	2.8163	3.4556	3.2224	3.5674	2.5259	3.2031	3.0292
Z_D (m)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
P_{atm} (Pa)	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325	101325
P_v (Pa)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
ρ (kg/m ³)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$NPSH_d$ (m)	12.14	12.14	12.78	12.55	12.89	11.85	12.53	12.35
$NPSH_{r_r}$ (m)	3.61	7.38	3.29	6.15	3.35	6.15	5.14	4.24
$NPSH_r$ + Margem (m)	4.91	8.68	4.59	7.45	4.65	7.45	6.44	5.54

Tabela 20: Avaliação dos valores de $NPSH_d$ e comparação com os valores de $NPSH_r$ + Margem.

Observa-se assim, a não ocorrência de cavitação em qualquer um dos grupos eletrobomba, tanto para o funcionamento a 50 Hz e 43 Hz. No entanto esta análise revela-se um pouco simplista pois considera-se a média dos valores obtidos para a carga na aspiração, e não as situações mais gravosas (pressões na aspiração mais reduzidas). Assim foi verificada a situação de carga mínima na aspiração.

Registou-se assim um valor mínimo de pressão na aspiração de 0.0930 bar o que corresponde a um valor de $NPSH_d$ na ordem dos 11 m. Igualando este valor à equação da curva do $NPSH_r$ + Margem verifica-se um caudal máximo de aproximadamente 470 l/s (figura 65).

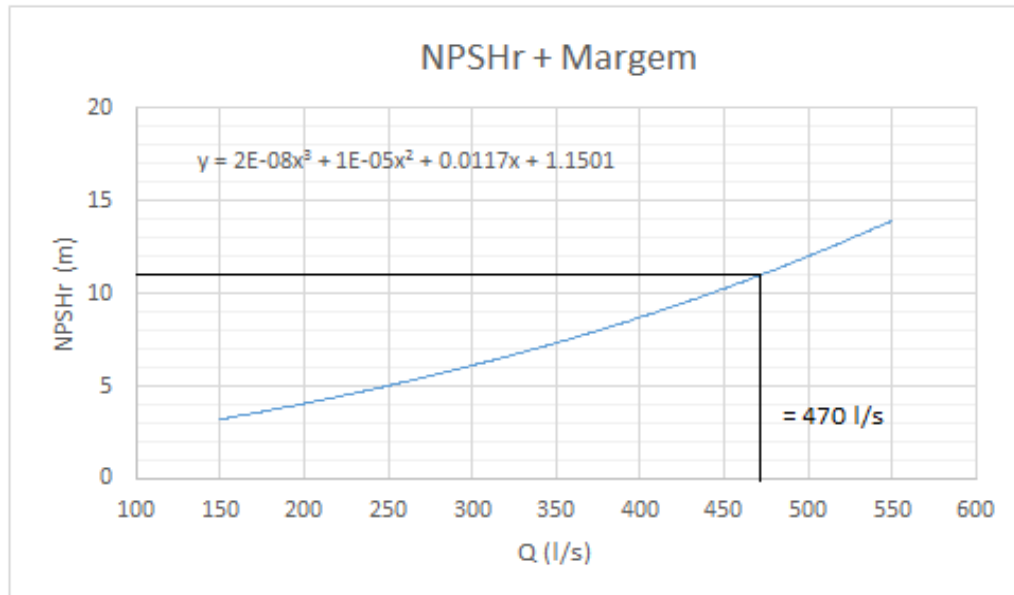


Figura 66: Valor de caudal máximo para os valores mínimos de carga na aspiração.

Conclui-se assim que para a situação de carga mínima na aspiração e para um funcionamento dos grupos elevatórios a 50 Hz (originalmente previsto) poderão ocorrer, para o ponto de funcionamento calculado em 4.5.3. (484.6 l/s), problemas de cavitação (ver intersecção da CCI com CCB da figura 66).

No entanto e como atualmente os grupos funcionam com variadores de frequência e tendo em conta o desgaste existente (elevação de caudais inferiores) o problema de cavitação está posto de parte, para o presente momento de análise. Não obstante será imperioso a realização de novos testes e verificação de pressões mínimas na tubagem de aspiração, se foram adotadas medidas de otimização como substituição dos impulsores dos grupos eletrobomba, ou mesmo a substituição dos grupos por outros de maior rendimento. Um ajuste nos níveis de paragem de funcionamento dos grupos, seria uma solução a estudar, se forem adotadas estas medidas, por forma a aumentar a carga mínima na aspiração.

5

ESTAÇÃO ELEVATÓRIA MOLHE SUL. OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

Concluídas as análises aos testes de desempenho realizados à EE, e averiguadas as reais condições de funcionamento dos grupos elevatórios, segue-se no desenvolvimento do plano de otimização energética a identificação de algumas possíveis soluções de maneira a melhorar o desempenho do sistema, diminuindo, porventura, os custos devido a ineficiências dos mesmos.

Começa assim este capítulo por analisar os gastos de energia por m³ de água elevada, através dos indicadores de eficiência energética, já mencionados no capítulo 3. Segue-se uma análise aos sobrecustos existentes devido às ineficiências registadas durante os testes de eficiência aos grupos eletrobomba.

Assim e por forma a reduzir os sobrecustos existentes são sugeridas algumas possíveis soluções de otimização para a presente estação elevatória, tendo sido feito uma análise comparativa entre a situação atual e o comportamento expectável do sistema elevatório para algumas das soluções apresentadas.

5.1. INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Seguindo o analisado e escrito no subcapítulo 3.2 foram calculados os indicadores de eficiência energética para a estação elevatória Molhe Sul, procurando assim avaliar o nível de desempenho desta e os respetivos custos de energia. Estes indicadores permitem-nos também ter uma real noção do nível de eficiência energética de cada grupo elevatório da EE estudada. Especial atenção para o indicador da ERSAR, visto que esta entidade reguladora todos os anos publica um relatório (RASARP) com a avaliação das estações elevatórias tendo como base os valores padrões apresentados na tabela 21.

Indicador ERSAR (kWh/(m ³ .100))	
Boa eficiência energética]0.27;0.45]
Mediana eficiência energética]0.45;0.68]
Má eficiência energética]0.68;∞]

Tabela 21: Gama de valores do Indicador ERSAR para avaliação da eficiência energética.

Na tabela 22, são apresentados os resultados dos indicadores de eficiência para os pontos de funcionamento real obtidos nos ensaios aos grupos eletrobomba isolados (43 e 50 Hz)

Indicador de Eficiência	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 4	
	43 Hz	50 Hz	43 Hz	50 Hz	43 Hz	50 Hz
Energia Específica (kWh/m ³)	0.1354	0.1438	0.1405	0.1488	0.1411	0.1505
Indicador ERSAR (kWh/(m ³ .100))	0.4070	0.3962	0.4353	0.4267	0.4378	0.4275
Green Pump index (GPX)	58	55	56	53	56	53

Tabela 22: Indicadores de eficiências para o funcionamento isolado dos grupos nº1, nº2 e nº4.

Analisando a tabela acima verificamos que relativamente à Energia Específica, o grupo 1 regista os valores mais reduzidos, tanto para o funcionamento a 43 Hz como para 50 Hz, o que vai de encontro aos resultados obtidos no teste de eficiência, onde se constatou que este grupo apresenta a melhor eficiência energética, dos três grupos testados. O grupo nº4 é o que apresenta os valores mais elevados, correspondendo a um aumento de 4.2% e 0.43% relativamente aos grupos nº1 e nº2 respetivamente, para a situação normal de funcionamento isolado dos grupos a 43 Hz.

Por outro lado, também se observa uma redução da Energia Específica, diminuindo a frequência de operação dos grupos elevatórios, o que é sustentado pelo afastamento dos pontos de funcionamento reais obtidos, para a esquerda comparativamente ao BEP para a frequência de 43 Hz. No entanto os rendimentos obtidos nos testes de eficiência a 43 Hz foram ligeiramente inferiores aos obtidos pelo funcionamento a 50 Hz, o que é explicado pela redução de potência hidráulica ser mais relevante do que a redução de eficiência. Assim acaba por ser vantajoso o funcionamento a 43 Hz, implicando custos de energia mais baixos.

No que diz respeito ao indicador da ERSAR rapidamente constatamos que todos os grupos eletrobomba, estão com um bom nível de eficiência, para qualquer das gamas de frequência testadas. Não obstante, verifica-se um paradoxo comportamental relativamente ao observado pelo indicador Energia Específica, onde se regista um agravamento do indicador da ERSAR com a diminuição da frequência de funcionamento. Este comportamento distinto é explicado pelo menor rendimento registado para a gama de frequência a 43 Hz, e por este indicador homogeneizar a parcela relativa a altura manométrica, o que pode ser benéfico na comparação de eficiência de EE distintas, apresentando, no entanto, desvantagens comparativamente ao indicador da Energia Específica aquando da avaliação para a mesma EE.

Por último, mas não menos importante, o indicador GPX permite-nos, numa abordagem diferente dos indicadores anteriores, ter uma noção do potencial de otimização dos grupos avaliados. Verifica-se assim um nível de eficiência abaixo do recomendado (comparar valores da tabela 20, com a escala de classificações da figura 24), para todos os pontos de funcionamento reais obtidos. De notar ainda não existem grandes diferenças dos valores obtidos, tendo o grupo nº1 em funcionamento a 43 Hz, registado o valor mais aceitável.

Foi realizada também a mesma análise para o funcionamento conjunto de 2 e 3 grupos elevatórios, estando apresentados os resultados na tabela 23. Relembrar que para o funcionamento em paralelo dos grupos, só foi testado o funcionamento a 50 Hz, correspondente à situação normal de operação.

Indicador de Eficiência	Grupo nº2 + nº4	Grupo nº1 + nº2 + nº4
	50 Hz	50 Hz
Energia Específica (kWh/m³)	0.1727	0.2038
Indicador ERSAR (kWh/(m³.100))	0.4257	0.4427
Green Pump index (GPX)	46	39

Tabela 23: Indicadores de eficiência energética para funcionamento simultâneo de 2 e 3 grupos eletrobomba.

Como esperado regista-se um agravamento de desempenho para o funcionamento em paralelo dos grupos (eficiências mais baixas), comparativamente ao verificado no funcionamento isolado. Assim observa-se um aumento de 17 % e de 38 % de Energia Específica para o funcionamento de 2 e 3 grupos em simultâneo respetivamente, comparativamente à operação isolada dos grupos a 50 Hz.

Relativamente ao indicador da ERSAR observa-se, como seria expectável, um incremento de 2.1% para o funcionamento de 2 grupos em paralelo e de 6.2% para o funcionamento de 3 grupos em conjunto, relativamente à média do funcionamento isolado para 50 Hz.

O indicador GPX, continua a apontar para um funcionamento abaixo do recomendado, sendo nestas duas situações, valores mais preocupantes dos que os verificados no funcionamento isolado.

Desta forma conclui-se que, quer para o funcionamento isolado dos grupos quer para o funcionamento em conjunto, existe alguma margem para aumentar a eficiência energética desta EE diminuindo assim os custos de consumo de energia inerentes às ineficiências existentes.

5.2. CUSTOS DEVIDOS A INEFICIÊNCIAS

Tendo como base a informação disponibilizada pela empresa Águas do Norte S.A., relativa aos volumes diários bombados para o ano de 2014 (ver anexo A), foi possível realizar uma estimativa dos sobrecustos de energia devido à redução de eficiência dos grupos eletrobomba. O custo médio de energia considerado foi de 0.14 €/kWh, baseado nos preços da eletricidade para consumidores industriais da PorData, cujas fontes são o Eurostat, Agências de Energia, Companhias de Eletricidade, etc.

Não tendo sido possível obter dados sobre o número de horas de funcionamento de cada bomba em funcionamento isolado e em simultâneo, foi considerado para a presente análise uma distribuição equitativa do caudal bombado ao longo de um dia, para cada grupo elevatório sempre em funcionamento isolado.

Para o ano de 2014 foram então registados os seguintes valores:

- Volume anual elevado: 4 691 013 m³;
- Volume diário médio anual elevado: 12 852 m³/dia;
- N° de grupos eletrobomba em funcionamento: 3;
- Volume médio diário elevado por bomba: 4 284 m³/dia;
- Custo médio de energia: 0.14 €/kWh

Assim na tabela 24 podemos observar o potencial máximo de poupança devido às ineficiências registadas nos grupos eletrobomba para uma hipotética situação de funcionamento destes no seu BEP, considerado como o seu ponto ideal de funcionamento, o que porventura será difícil de acontecer.

Salientar que esta análise foi feita apenas para o funcionamento a 43 Hz, visto corresponder à frequência normal de operação dos grupos aquando do funcionamento isolado destes.

EE Molhe Sul	Grupo	Es (kWh/m ³)	Es BEP (kWh/m ³)	Δ Es (%)	Poupança Energética (kWh/ano)	Potencial de Poupança (€/ano)
	Nº1	0.1354	0.1099	23.18%	39 848	5579
	Nº2	0.1405	0.1099	27.82%	47 823	6695
	Nº4	0.1411	0.1099	28.37%	48 761	6827
Total					136 432	19 101

Tabela 24: Poupanças potenciais máximas.

Verifica-se uma poupança total máxima de 19101 € por ano, o que representa aproximadamente 26 % do total previsto com gastos de energia para os caudais bombeados durante o ano de 2014. Regista-se ainda que o grupo nº1 é o menos preponderante na parcela total de sobrecusto ao ano, o que vai de encontro ao concluído com os testes de eficiência (menor redução de eficiência comparativamente com o BEP).

No entanto estima-se que estes valores poderão ser superiores em virtude de, nesta análise, serem consideradas apenas o funcionamento isolado dos grupos elevatórios, o que não vai de encontro à realidade, havendo alturas do dia em que trabalharam 2 e 3 grupos em simultâneo, aumentando assim a Energia Específica e consequentemente os custos com energia elétrica.

5.3. ANÁLISE AOS CAUDAIS AFLUENTES

Tendo sido impossível obter uma distribuição horária do caudal afluente, por forma a poder analisar mais detalhadamente as reais necessidades de bombeamento deste sistema elevatório assim como a sua resposta às mesmas, foi admitido um hidrograma teórico de caudais afluentes ao longo do dia (figura 67), considerando o caudal médio diário anual bombeado para o ano de 2014 e os fatores de ponta

horários para cidades com populações entre os 10 000-100 000 habitantes, onde se insere a população servida por esta estação elevatória (19840 habitantes). Apesar do caudal bombeado não corresponder exatamente aos caudais afluentes considera-se esta análise uma boa aproximação dos mesmos tendo em conta a baixa capacidade de regularização do poço de bombagem.

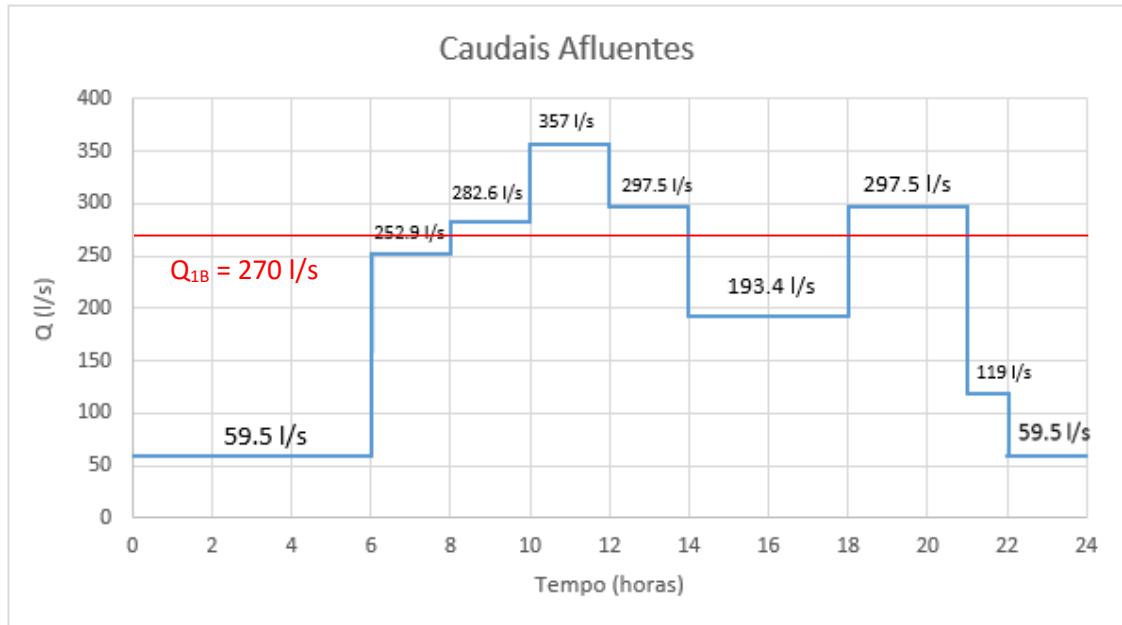


Figura 67: Variação teórica do caudal afluente e caudal de projeto para uma bomba em funcionamento isolado.

Verifica-se pela observação do hidrograma da figura 67 que o funcionamento isolado de cada grupo eletrobomba daria resposta a 62.5 % (15 horas) do dia, para o Cnda do ano de 2014 o que não se revela desapropriado, mas que poderia ser alvo de otimização.

De seguida verificou-se, para o funcionamento atual e para os caudais médios registados durante os testes de eficiência, o tempo médio de funcionamento de uma bomba durante um dia, o que tendo em conta o desgaste verificado será de esperar que seja inferior ao observado para o caudal de projeto.

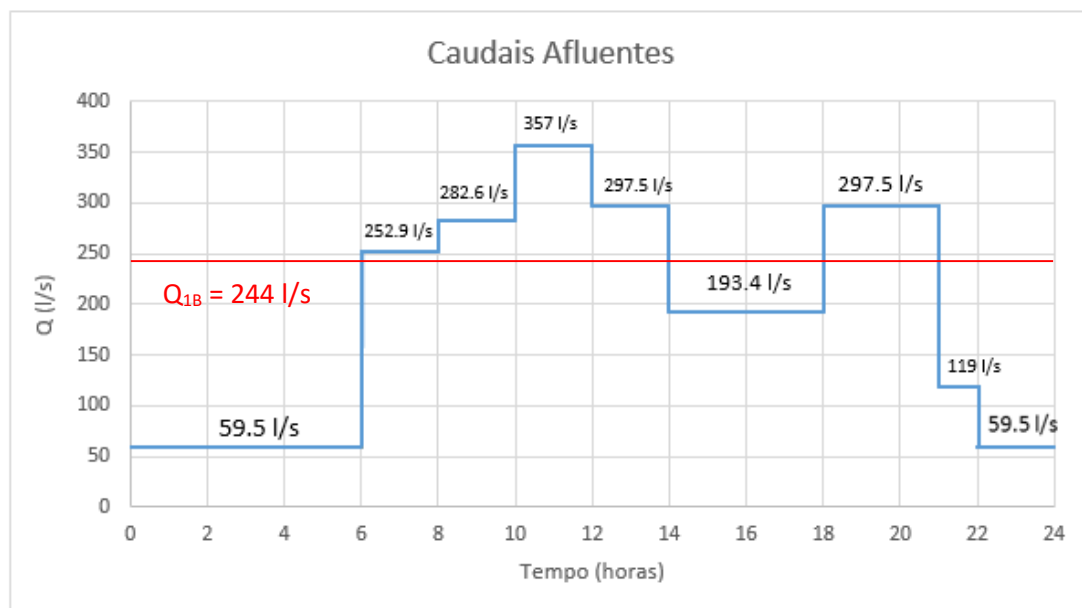


Figura 68: Hidrograma teórico de caudais afluentes e capacidade média de elevação para uma bomba para o funcionamento atual.

Observa-se que em média e para a operação atual, um grupo eletrobomba em funcionamento isolado consegue garantir as necessidades de bombeamento durante mais de metade do dia (13 horas), tendo no restante do dia ser posto em funcionamento simultâneo 2 bombas ($Q_{2B} = 615 \text{ l/s}$), isto tendo em conta que a presente análise se centra no caudal médio diário anual, pois como é expectável existirão dias onde o caudal será superior, especialmente nos meses de inverno, em que terão de operar 3 bombas em conjunto.

Assim, e olhando para os valores de Energia Específica para uma bomba e duas bombas (tabela 25) é de esperar, como já foi referido no ponto 5.2 consumos de energia ao final do ano superiores aos calculados, onde por ausência de dados do tempo de funcionamento dos grupos eletrobomba isolados e em simultâneo se admitiu uma distribuição equitativa do caudal anual bombeado pelas 3 bombas, tendo-se calculado posteriormente os consumos energéticos apenas para funcionamento isolado.

Funcionamento	Energia Específica (kWh/m³)	Utilização durante um dia
1 Bomba (43 Hz)	0.1390	54%
2 Bombas (50 Hz)	0.1727	46%
3 Bombas (50 Hz)	0.2038	0%

Tabela 25: Valores de Energia Específica para 1,2 e 3 bombas e respetivo funcionamento ao longo de um dia médio.

Seria aconselhável otimizar estes tempos de funcionamento, procurando que uma bomba garanta resposta a pelo menos 70% dos caudais afluentes ao longo do dia, diminuindo assim os tempos de funcionamento de 2 grupos em simultâneo e respetivos consumos energéticos. Esta análise será tida em consideração nos seguintes subcapítulos de estudo às soluções de otimização identificadas.

5.4. POTENCIAL DE OTIMIZAÇÃO

Tendo em atenção as conclusões observadas e analisadas pelos testes de eficiência realizados e o hidrograma teórico de caudais afluentes, apresentam-se de seguida as possíveis soluções de otimização identificadas, passíveis de reduzir os custos associados à energia elétrica, incrementando assim a eficiência global do sistema:

1. Reparação/substituição dos impulsores instalados atualmente, de todos os grupos eletrobomba, apesar de o grupo nº1 apresentar ainda um funcionamento aceitável, especialmente se comparado com os grupos nº 2 e 4;
2. Reparação/substituição dos impulsores atuais, ajustando a gama de frequências de funcionamento do VFD, procurando uma otimização ao nível de Energia Específica;
3. Redução do diâmetro do impulsor com e sem ajuste do VFD, de maneira a aproximar o funcionamento dos grupos eletrobomba às necessidades reais do sistema, atingindo assim níveis de eficiência superiores. Relembrar que tendo em atenção o caudal definido no projeto de execução, os grupos eletrobomba se encontram sobredimensionados para a curva real da instalação, sendo assim pertinente considerar uma redução do caudal máximo de elevação intrínseca à redução de diâmetro;
4. Ajuste da gama de frequências (aumento) de funcionamento dos VFD, para os grupos no seu estado atual, visto ter sido concluído uma diminuição da eficiência dos grupos para o funcionamento a 43 Hz comparativamente ao funcionamento a 50 Hz, explicado em parte pelo deslocamento acentuado do ponto real de funcionamento para a esquerda relativamente ao BEP (caudal bombado fora do intervalo recomendado), o que poderá indiciar problemas de recirculação e diminuição do tempo útil de vida dos impulsores;
5. Substituição dos grupos eletrobomba instalados por outros mais eficientes, para caudais e altura de elevação próximos do funcionamento a 43 Hz (operação mais adequada aos valores presentes no projeto de execução). Solução no entanto bastante dispendiosa, o que provavelmente não compensaria em termos de custo-benefício.

De referir que, e indo de encontro ao concluído na análise de existência de cavitação no ponto 4.6, seria indispensável uma verificação dos níveis de carga na conduta de aspiração, especialmente na solução de reparação/substituição dos impulsores atuais.

5.5. ANÁLISE DAS SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO

Apontadas as principais soluções de otimização identificadas para a presente EEAR foram, nesta fase, exploradas três dessas cinco soluções explanadas no ponto 5.4.

Inicialmente considerando a deterioração observada nos grupos eletrobomba, foi estudado um possível cenário de reparação/substituição dos impulsores atuais (Φ 467 mm) mantendo a gama de frequências atual para o funcionamento isolado e conjunto (Solução nº1).

De seguida e concomitantemente com a situação de reparação/substituição dos impulsores atuais foi examinada a eficácia dos variadores de velocidade instalados, tendo para isso sido avaliada a variação de Energia Específica em função da frequência de funcionamento dos mesmos (Solução nº2).

Por último procurou-se analisar o comportamento do sistema elevatório perante um cenário de redução do diâmetro dos grupos eletrobomba. Assim foi analisado o desempenho expectável das bombas para um diâmetro de 440 mm na situação de funcionamento isolado atual e na operação originalmente prevista (43 e 50 Hz respetivamente) e numa possível circunstância de possível ajuste dos VFD (Solução nº3).

Por outro lado, teria sido interessante avaliar o comportamento do sistema elevatório, considerando o estado atual dos grupos eletrobomba (impulsor 467 mm) procedendo a um ajuste nos VFD (Solução nº 4), no entanto como não foi possível durante a realização dos testes de eficiência ir fechando progressivamente a válvula de seccionamento de jusante, não foi exequível recriar a curva característica real da bomba o que limita o estudo desta solução.

A solução nº5 também não foi possível analisar devido à falta de informação relativa a outros modelos de grupos eletrobomba, sugere-se assim que em estudos futuros se explore esta situação.

5.5.1. REPARAÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DO IMPULSOR ATUAL (SOLUÇÃO 1)

Considerando o desgaste existente nos grupos eletrobomba, foi analisado o possível cenário de reparação/substituição dos impulsores atuais, mantendo o mesmo diâmetro (467 mm) e o funcionamento atual de 43 Hz.

Para a presente análise foi considerada a curva característica real da instalação, para o nível mínimo do poço, apresentada no ponto 4.5, tendo intersectado esta com a CCB original para o diâmetro de 467 mm (figura 43), conseguindo assim aferir o caudal debitado expectável para 1 bomba em funcionamento.

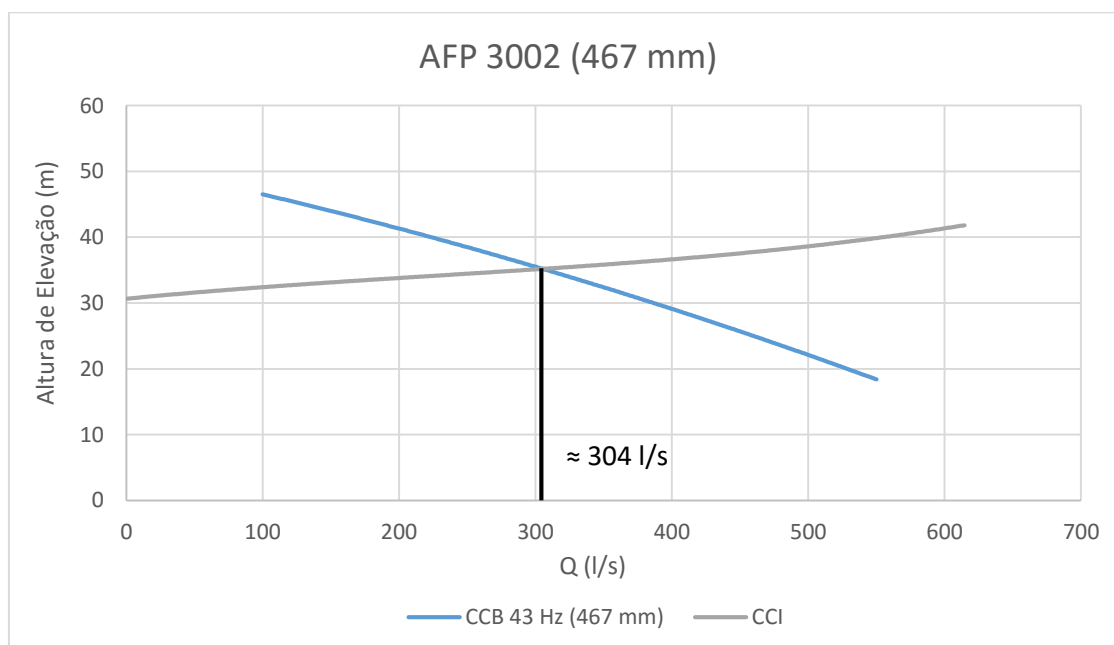


Figura 69: Caudal bombeado por uma bomba com reparação/substituição do impulsor

Pela observação da figura 69, espera-se um caudal debitado na ordem dos 304 l/s para a situação de reparação/substituição dos impulsores, o que representa um incremento de 60 l/s à média dos caudais debitados atualmente para a operação a 43 Hz (244 l/s). Assim espera-se um aumento de eficiência,

devido ao deslocamento do ponto de funcionamento para a direita, aproximando-se assim do BEP (344 l/s), o que se irá refletir na diminuição da Energia Específica, como se pode observar na tabela 26.

Foi também a título de curiosidade calculada a Energia Específica, para o funcionamento a 50 Hz, onde se verifica um aumento de 8 % comparativamente ao funcionamento a 43 Hz, o que nos leva a concluir que a opção pela instalação dos VFD na estação elevatória foi uma solução vantajosa.

Grupos	Energia Específica (Kwh/m³)			
	Situação atual (43 Hz)	Situação atual (50 Hz)	Rep. /Subs. do impulsor (43 Hz)	Rep./Subs. do impulsor (50 Hz)
Grupo Nº1	0.1354	0.1438		
Grupo Nº2	0.1405	0.1488	0.1235	0.1336
Grupo Nº4	0.1411	0.1505		

Tabela 26: Comparação do indicador Es, entre a situação atual e a solução de otimização de reparação/substituição do impulsor.

De seguida e considerando o hidrograma teórico de caudais afluentes apresentado em 5.3, verificou-se o nº de horas de funcionamento isolado e em simultâneo ao longo do dia que este cenário irá provocar, para posteriormente ser calculado os consumos energéticos.

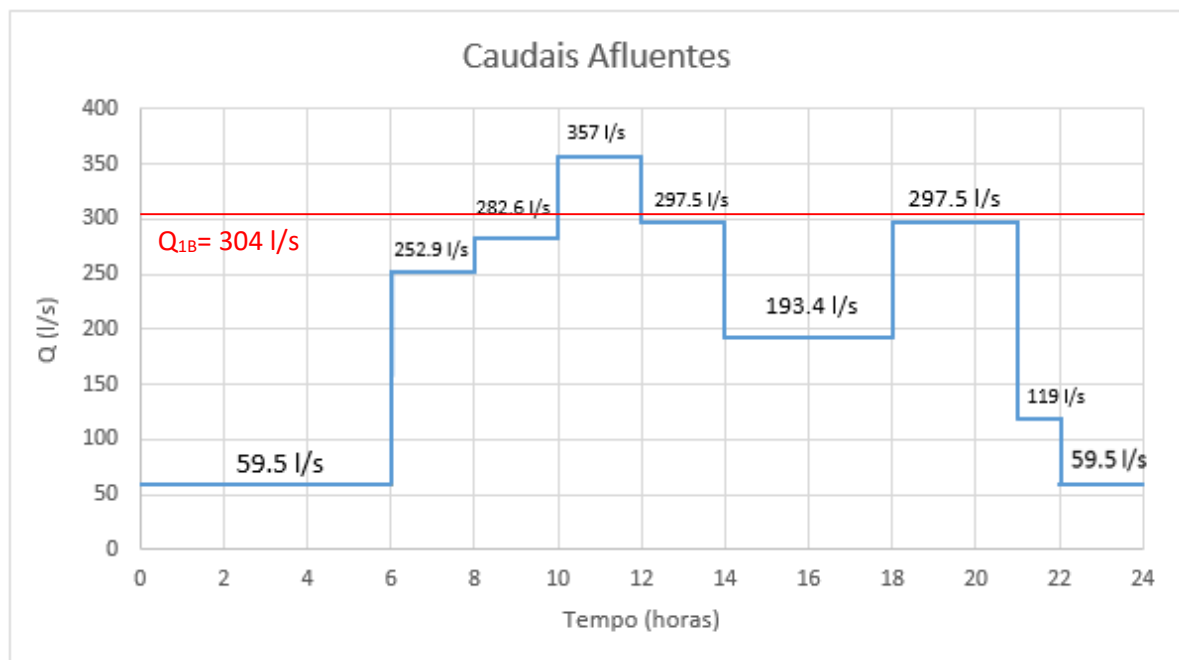


Figura 70: Capacidade de elevação de uma bomba para o cenário de reparação/substituição do impulsor, tendo em conta o hidrograma teórico de caudais afluentes.

Constata-se que com a reparação/substituição dos impulsores, apenas durante um período de 2 horas do dia (8.3 %) será necessário por em funcionamento de duas bombas em simultâneo, conseguindo assim que uma bomba em funcionamento isolado garanta capacidade de elevação a mais de 90% dos caudais afluentes ao longo do dia, diminuindo assim os maiores consumos energéticos associados ao funcionamento de duas ou três bombas em paralelo.

Assim foram calculadas as diferenças de consumos energéticos, que este possível cenário de substituição/reparação dos impulsores atuais implicaria ao final do ano, comparativamente à situação registada atualmente. Para isso, como já foi referido, foram usados os valores de caudais bombados ao longo do ano de 2014. Para o cenário atual foi considerada a Energia Específica média dos 3 grupos eletrobomba testados, na operação isolada de cada grupo. No funcionamento de dois grupos em simultâneo a frequência de 50 Hz foi mantida.

Funcionamento	Horas/dia (%)		Energia Específica (kWh/m³)		Energia total (kW.h)		Dif. (kWh/ano)	Poupança (€/ano)
	Cenário		Cenário		Cenário			
	Atual	Rep./Subs. do Impulsor	Atual	Rep./Subs. do Impulsor	Atual	Rep./Subs. do Impulsor		
1 Bomba	54	91.7	0.1390	0.1235	352 107	531 255	+ 179 148	+ 25 081
2 Bombas	46	8.3	0.1727	0.1607	372 663	62 569	- 310 094	- 43 413
Total					724 771	578 338	- 130 946	-18 332

Tabela 27: Diferenças de consumo energia entre o cenário atual e uma possível reparação/substituição dos impulsores, tendo em atenção o funcionamento isolado ou em conjunto dos grupos eletrobomba.

Verifica-se pela análise da tabela 27, poupanças significativas de energia, na ordem dos 18 332 €/ano, o que representa um potencial de redução de 18% nos custos anuais de energia da estação elevatória. Tendo em conta um investimento inicial na ordem dos 22 500 € para adquirir os 3 impulsores (considerando um custo unitário do impulsor de 7500 €), espera-se um período de retorno de 1.2 anos.

Por outro lado, será expectável que o inerente aumento do caudal bombado associado a esta solução de otimização, diminua o tempo de funcionamento dos grupos eletrobomba, o que irá provocar um maior número de arranques dos grupos, aos quais estão anexados um maior consumo energético, seria por isso aconselhável efetuar posteriormente uma análise e eventuais ajustes aos níveis do poço de bombagem.

5.5.2. REPARAÇÃO/SUBSTITUIÇÃO DO IMPULSOR ATUAL, AJUSTANDO VFD (SOLUÇÃO 2)

Atendendo à existência de VFD, estudou-se a possibilidade de otimizar o funcionamento dos mesmos, baseando esta análise na variação da Energia Específica em função da frequência. Desta forma é possível balizar a frequência mínima de funcionamento, tendo em conta a diminuição máxima aconselhável para manter o correto funcionamento dos grupos e o valor mínimo de Energia Específica.

Assim para o cenário de reparação/substituição dos impulsores atuais (467 mm), foi estudado se a alteração do funcionamento na gama atual de frequências, poderia trazer benefícios ao nível dos consumos energéticos. Para isso foram analisadas frequências desde os 50 Hz até aos 39 Hz (figura 71).

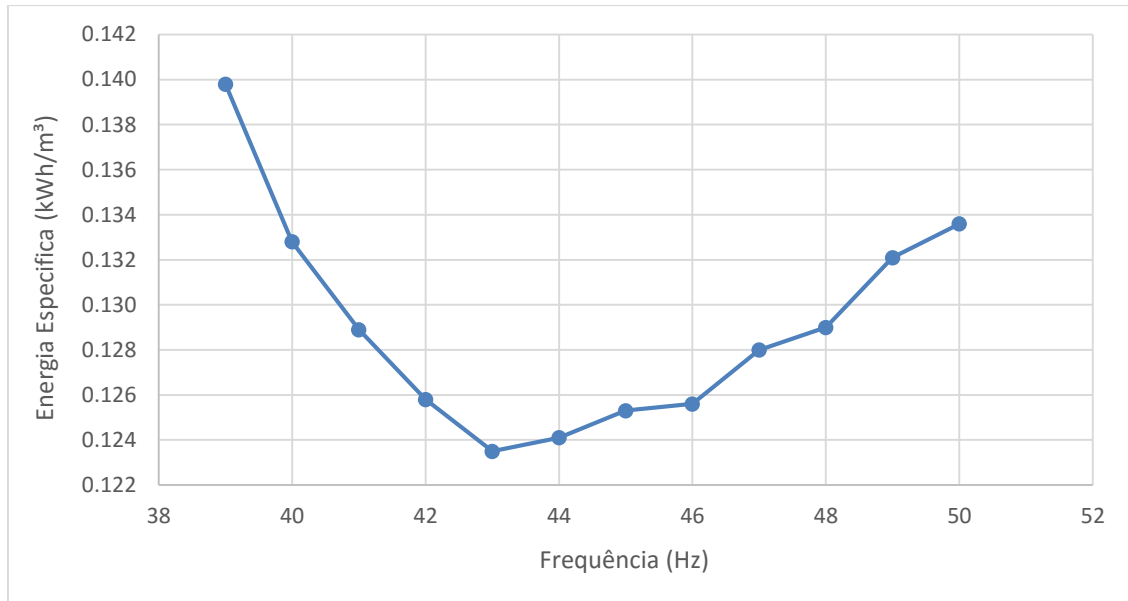


Figura 71: Variação da Energia Específica em função da frequência, para cenário de reparação/substituição dos impulsores.

Observa-se pela análise da figura 71, que os VFD já estão otimizados para o funcionamento atual (43 Hz), onde se verifica uma Energia Específica de 0.1235 kWh/m³.

Não obstante, refira-se que um funcionamento abaixo desta frequência, provocaria uma redução de eficiência mais significativa do que o efeito de redução do caudal, deixando então nessa situação de os variadores representarem uma vantagem.

Freq. (Hz)	Q (l/s)	P (kW)	H (m)	η (%)	Es (kWh/m³)
50	477.9	209.9	38.05	82.90	0.1336
49	450.3	195.5	37.51	83.67	0.1321
48	431.2	182.7	37.16	83.95	0.1290
47	403.5	169.5	36.68	85.02	0.1280
46	382.2	157.6	36.33	84.99	0.1256
45	353.8	145.5	35.88	84.71	0.1253
44	330.0	134.5	35.51	84.18	0.1241
43	303.7	123.1	35.13	83.20	0.1235
42	273.7	113.0	34.70	81.65	0.1258
41	243.0	102.8	34.28	78.98	0.1289
40	213.7	93.2	33.88	75.62	0.1328
39	182.5	83.8	33.45	70.98	0.1398

Tabela 28: Ponto de funcionamento dos grupos elevatórios e Energia Específica em função da frequência para cenário de reparação/substituição do impulsor.

Como se pode observar pela tabela 28, baixando a frequência mais do que os 43 Hz, a redução de eficiência começa a ser mais significativa do que a inerente diminuição de altura de elevação, o que não aconselha a operação abaixo desta gama de frequência.

Desta forma considera-se que os consumos de energia, já estão otimizados no máximo, proporcionando a reparação/substituição dos impulsores atuais, as poupanças já calculadas no ponto 5.5.1, apresentadas na tabela 27.

5.5.3. REDUÇÃO DO DIÂMETRO DO IMPULSOR SEM E COM AJUSTE DO VFD (SOLUÇÃO 3)

Atualmente os grupos eletrobomba estão equipados com impulsores de 467 mm, tendo sido analisado o seu comportamento para impulsores de 440 mm.

A curva característica da bomba ($H=f(Q)$) para este diâmetro de impulsor foi fornecida pelo fabricante (ABS), para 50 Hz, tendo sido obtida a curva a 43 Hz, de forma análoga à realizada para as curvas características da bomba com diâmetro de 467 mm, isto é, pelas leis de afinidade apresentadas em 4.2.2.

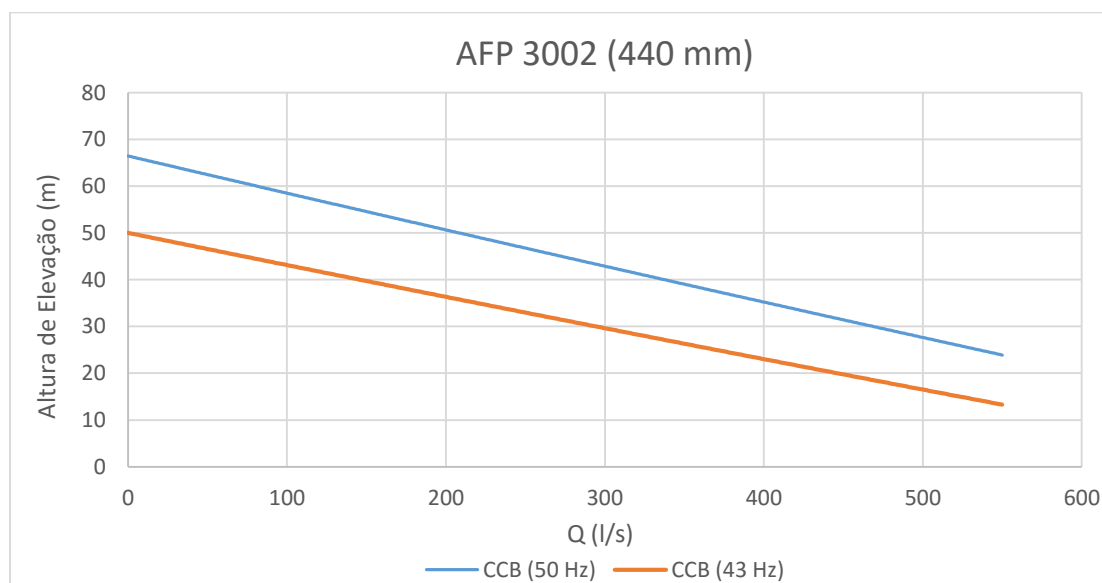


Figura 72: CCB ($H=f(Q)$) para diâmetro do impulsor de 440 mm.

Apresenta-se de seguida também a curva característica da bomba na variação do binómio potência/caudal ($P=f(Q)$), pois será útil para observação dos valores de potência para o caudal elevado pelas bombas com impulsor de 440 mm e posterior avaliação dos custos energéticos.

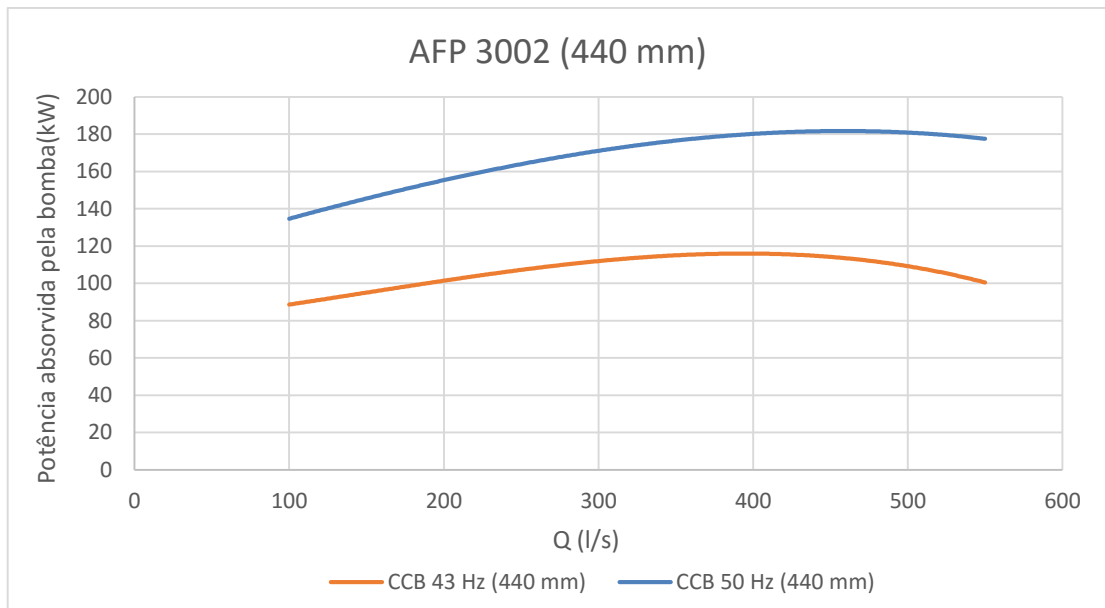


Figura 73: CCB ($P=f(Q)$) para diâmetro do impulsor de 440 mm.

A curva característica dos rendimentos ($\eta=f(Q)$), também é relevante, de forma a avaliar a eficiência da bomba e é apresentada de seguida.

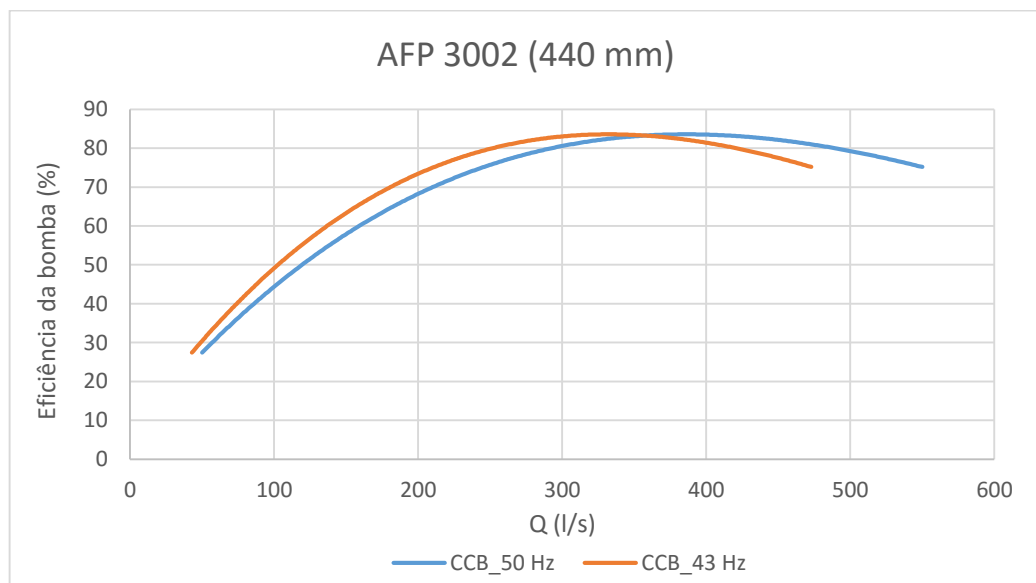


Figura 74: CCB ($\eta=f(Q)$) para diâmetro do impulsor de 440 mm.

Para a presente análise foi considerada, tal como na solução de otimização nº1, a curva característica real da instalação apresentada no ponto 4.5, tendo intersectado esta com a CCB para o diâmetro de 440 mm (figura 72), conseguindo assim aferir o caudal debitado expectável para 1 bomba em funcionamento.

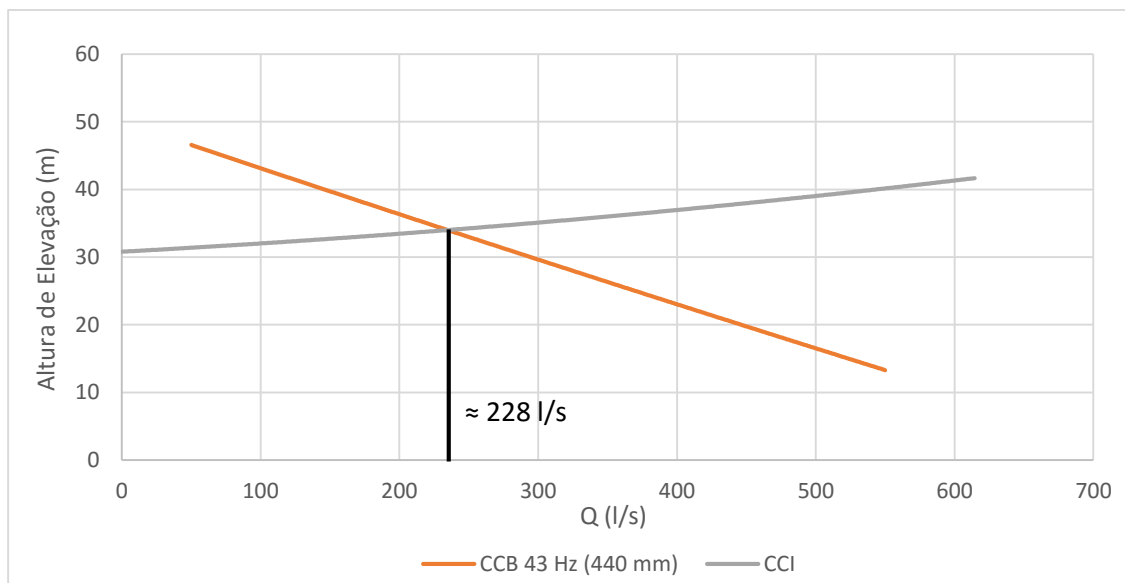


Figura 75: Caudal bombeado por uma bomba a 43 Hz com impulsor de 440 mm.

Verificou-se um caudal na ordem dos 228 l/s, o que comparativamente com os caudais debitados atualmente (média de 244 l/s, para o funcionamento isolado a 43 Hz), representa um decréscimo na ordem dos 7 %, não se registando assim uma diferença muito significativa. Este facto deve-se ao desgaste existente atualmente nos grupos, sendo a presente análise realizada para a situação sem desgaste dos impulsores de 440 mm, pois não existe um padrão de desgaste definido, o que impossibilita uma análise mais detalhada.

De seguida, e apesar de atualmente os grupos eletrobomba isoladamente não funcionarem a esta frequência, foi analisada a mesma situação, mas para um funcionamento a 50 Hz das bombas, de forma a averiguar se com a redução de diâmetro do impulsor compensaria, ao nível de consumos energéticos, a operação a esta frequência.

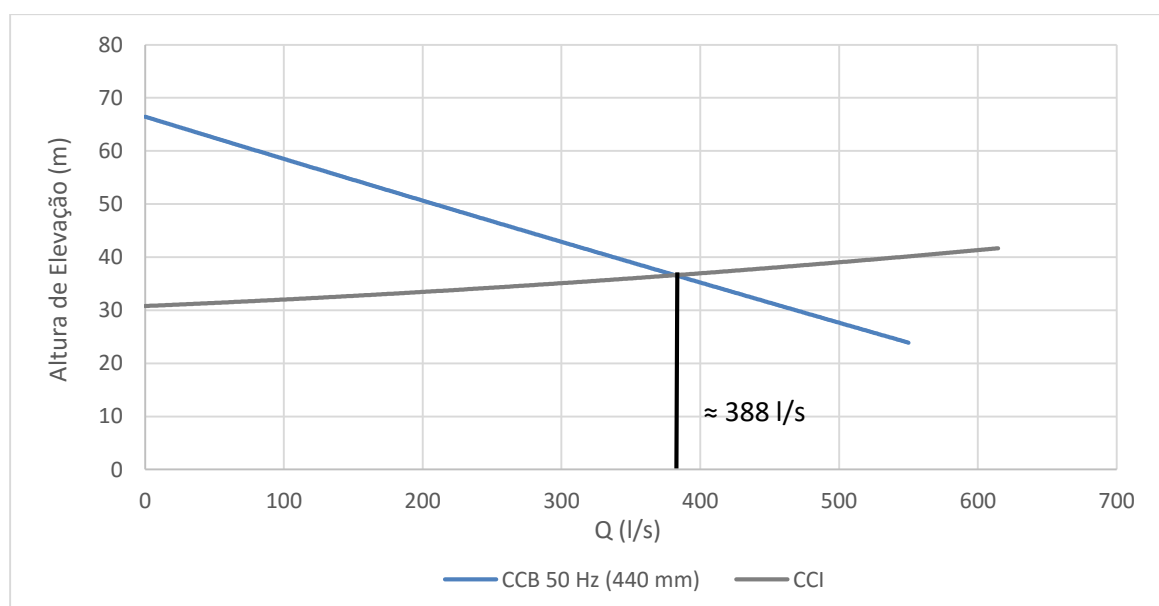


Figura 76: Caudal bombeado por uma bomba a 50 Hz com impulsor de 440 mm.

Observa-se um caudal debitado expectável na ordem dos 388 l/s, o que pelas mesmas razões da situação de funcionamento a 43 Hz, não se afasta muito da média verificada para a operação atual a 50 Hz (370 l/s).

Assim e considerando os caudais observados, foi possível comparar o indicador Energia Específica (kWh/m³) para a situação atual e para a situação de otimização acima estudada.

Grupos	Energia Específica (Kwh/m ³)			
	Situação atual (43 Hz)	Situação atual (50 Hz)	Red. Diâmetro (43 Hz)	Red. Diâmetro (50 Hz)
Grupo Nº1	0.1354	0.1438		
Grupo Nº2	0.1405	0.1488	0.1409	0.1392
Grupo Nº4	0.1411	0.1505		

Tabela 29: Comparação do indicador Es, entre a situação atual e a solução de otimização de redução de diâmetro sem ajuste do VFD.

Aferiu-se que para os grupos nº1 e nº2 em funcionamento a 43 Hz (operação normal atual, para funcionamento isolado), ocorre um aumento da Energia Específica, não se justificando a redução de diâmetro para gama de frequência atual. Para o funcionamento a 50 Hz, já se verificou uma diminuição de energia consumida, em todos os grupos eletrobomba o que é explicado pelo facto de ocorrer um aumento de eficiência nos grupos mantendo-se praticamente a mesma altura de elevação.

Verifica-se assim, que para a redução de diâmetro do impulsor, o funcionamento a 50 Hz apresenta consumos energéticos inferiores aos da operação a 43 Hz, não compensando neste cenário o funcionamento dos variadores na frequência atual, devendo por isso ser estudado um possível ajuste na gama de frequências.

Ajuste do VFD

Aproveitando, mais uma vez, o facto dos grupos eletrobomba já estarem associados a variadores de frequência e de se ter registado valores de Energia Específica superiores aos atuais para o cenário de redução do diâmetro do impulsor no funcionamento atual (43 Hz), averiguou-se a possibilidade de um ajuste da gama de frequências dos variadores.

Assim, tal como na solução nº2, foram analisados os pontos de funcionamento dos grupos eletrobomba para as gamas de frequência desde os 50 Hz até aos 39 Hz (figura 77).

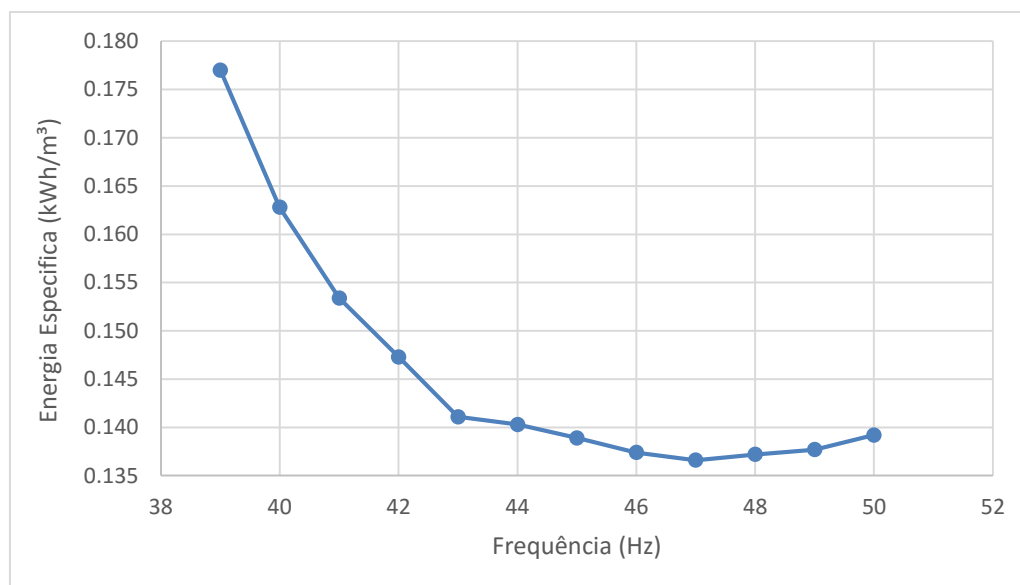


Figura 77: Variação da Energia Específica em função da frequência, para cenário de redução do diâmetro do impulsor.

Verifica-se então que no caso de redução do diâmetro do impulsor, o mais vantajoso ao nível dos consumos energéticos seria pôr os grupos eletrobomba a funcionar aos 47 Hz. Operações com frequências abaixo deste valor, implicariam reduções de eficiência bastante significativas o que levaria a valores de Energia Específica bastante elevados.

Freq. (Hz)	Q (l/s)	P (kW)	H (m)	η (%)	Es (kWh/m³)
50	387.8	179.4	36.42	83.75	0.1392
49	372.4	168.4	36.17	83.57	0.1377
48	345.9	155.8	35.75	83.12	0.1372
47	325.4	146.0	35.45	82.89	0.1366
46	300.2	135.4	35.08	82.12	0.1374
45	273.4	124.7	34.70	80.77	0.1389
44	249.0	114.7	34.36	79.22	0.1403
43	227.8	105.4	34.07	76.23	0.1409
42	197.0	95.3	33.65	73.71	0.1473
41	171.3	86.3	33.30	69.82	0.1534
40	145.4	77.7	32.94	64.84	0.1628
39	119.4	69.4	32.57	58.63	0.1770

Tabela 30: Ponto de funcionamento dos grupos elevatórios e Energia Específica em função da frequência, para cenário de redução do diâmetro do impulsor.

Como se pode observar na tabela 30, para valores abaixo dos 47 Hz a redução de potência hidráulica não compensa a diminuição de eficiência, acabando por ocorrer um aumento significativo da Energia Específica. Assim para o ponto de funcionamento a 47 Hz, foram analisados os benefícios que esta

solução poderá acarretar ao final do ano ao nível dos consumos energéticos, comparativamente com a solução atual.

Para isso foram considerados os tempos de funcionamento de uma e duas bombas para o caudal registado na frequência de 47 Hz, tendo em atenção o hidrograma de caudais afluentes (figura 78).

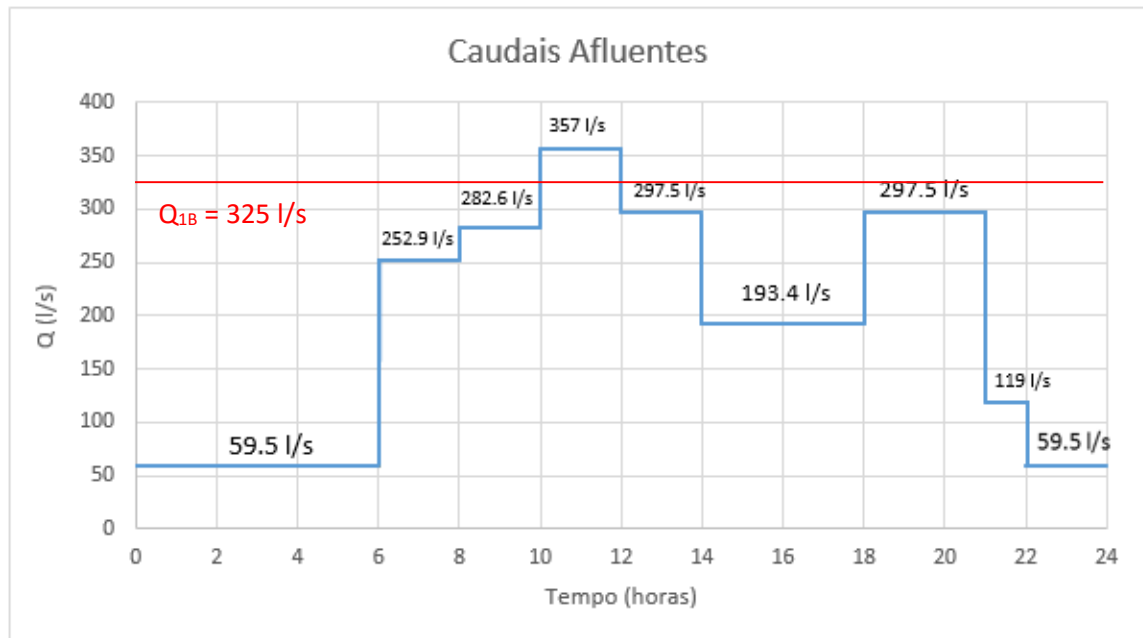


Figura 78: Capacidade de elevação de uma bomba para o cenário de redução do diâmetro do impulsor, tendo em conta o hidrograma teórico de caudais afluentes.

Tal como para a solução nº1 verifica-se uma bomba em funcionamento isolado garante mais de 90% dos caudais afluentes durante um dia, sendo necessário pôr duas bombas em operação apenas 2 horas do dia (10h - 12h).

De seguida calcularam-se então os consumos energéticos que este cenário provocaria, procurando avaliar as poupanças ao final do ano. Referir que a Energia Específica considerada para uma 1 bomba, para o cenário atual, foi a média dos 3 grupos testados.

Funcionamento	Horas/dia (%)		Energia Específica (kWh/m³)		Energia total (kW.h)		Dif. (kWh/ano)	Poupança (€/ano)
	Atual	Cenário Red.	Atual	Cenário Red.	Atual	Cenário Red.		
		Diâmetro. do Impulsor		Diâmetro do Impulsor		Diâmetro do Impulsor		
1 Bomba	54	91.7	0.1390	0.1366	352 107	587 607	+ 235 500	+ 32 970
2 Bombas	46	8.3	0.1727	0.1680	372 663	65 411	- 307 252	- 43 015
Total					724 771	653 018	- 71 752	-10 045

Tabela 31: Diferenças de consumo energia entre o cenário atual e uma possível redução do diâmetro dos impulsores, tendo em atenção o funcionamento isolado ou em conjunto dos grupos eletrobomba

Pela observação da tabela 31, verificamos uma poupança anual na ordem dos 10 000 €, o que representa uma redução de 10 % relativamente aos custos energéticos atuais.

Referir que, porventura, outros valores de diâmetros de impulsores poderiam trazer mais benefícios económicos para o presente sistema elevatório. No entanto não foi possível analisar esse cenário.

5.6. AVALIAÇÃO ECONÓMICA DAS SOLUÇÕES DE OTIMIZAÇÃO ESTUDADAS

Identificadas e estudadas algumas das soluções de otimização aplicáveis à presente EE, é pertinente realizar uma análise comparativa entre as diferentes soluções, procurando assim escolher a que maior vantagem trará do ponto de visto económico.

Esta avaliação será feita tendo como base a variável auxiliar “Payback simples”, que permite analisar o tempo de retorno esperado do investimento inicial que terá de ser efetuado.

Solução de otimização	Consumos Energéticos (kWh/ano)	Investimento Inicial (€)	Poupança Anual (€)	Tempo de retorno (anos)
Reparação/Substituição do impulsor atual (Φ 467 mm) 43 Hz	578 338	22500	18 332	1.23
Redução do diâmetro do impulsor (Φ 440 mm) 47 Hz	653 018	22500	10 045	2.24

Tabela 32: Avaliação económica das alternativas de otimização estudadas

Como se pode verificar pela tabela 32 a solução mais vantajosa economicamente, é a de reparação/substituição dos impulsores atuais, mantendo o funcionamento atual a 43 Hz, com uma poupança anual de 18 332 € e um tempo de retorno de 1.23 anos ao investimento inicial que teria de ser efetuado para adquirir os impulsores. O valor de aquisição considerado para os impulsores, foi de 7500 € cada um, em coerência com o descrito anteriormente.

Salientar que para o cenário de redução de diâmetro do impulsor, como já foi referido anteriormente, a opção por manter o funcionamento a 43 Hz não traria benefícios económicos, no que diz respeito aos consumos energéticos, tendo por isso sido feita a avaliação económica para o cenário de ajuste dos VFD para os 47 Hz. Registou-se uma poupança de 10 045 €/ano e tempo de retorno de 2.24 anos ao investimento a efetuar para aquisição dos 3 impulsores.

Não obstante, e tendo em conta a existência de 4 grupos elevatórios na EE, deverá ser analisado e discutido um planeamento financeiro adequado e eventual faseamento no tempo, para a aquisição dos impulsores.

6

CONCLUSÕES

No presente capítulo serão apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação, com compreensível enfoque no caso prático estudado.

Por último serão identificadas algumas possíveis sugestões para trabalhos futuros, inseridos nesta temática e em concreto para o caso de estudo analisado.

6.1. CONCLUSÕES SOBRE O CASO PRÁTICO ESTUDADO

Como nota final, é importante referir que, tratando-se de um tema bastante recente, a otimização de sistemas hidráulicos deve, cada vez mais frequentemente, ser uma preocupação das entidades gestoras com vista ao aumento dos níveis de sustentabilidade económica e eficiência dos serviços prestados. Como ficou provado com o trabalho desenvolvido, os benefícios do aumento de eficiência e consequentes reduções dos custos energéticos são reais e assinaláveis tendo em atenção os custos médios gastos com energia elétrica no setor da água.

Perante este cenário as estações elevatórias de águas residuais surgem com um potencial de otimização enorme, especialmente tendo em atenção que os grupos eletrobomba, como consumidores intensivos de energia, representam aproximadamente 65 % (ERSAR) do total de energia consumida no setor da água, estando variadíssimas a operar de forma ineficiente, tendo em atenção o indicador da ERSAR.

Os testes de eficiência, efetuados pelo método convencional, realizados a 3 dos 4 grupos eletrobomba instalados na Estação Elevatória de Águas Residuais do Molhe Sul, permitiram registar ineficiências consideráveis, especialmente nos grupos nº2 e nº4 com reduções na ordem dos 16.5 % comparativamente ao BEP. Estando atualmente a funcionar com VFD, para a operação isolada, os grupos eletrobomba apresentaram níveis de eficiência mais baixos para a operação a 43 Hz (atual) do que para um funcionamento a 50 Hz (originalmente previsto), o que, no entanto, se revela menos significativo do que a redução de potência hidráulica inerente à redução de frequência, acabando assim por ser vantajoso ao nível dos consumos energéticos.

No entanto o desgaste registado nos grupos, resulta em caudais debitados bastante afastados do BEP, o que poderá provocar situações de recirculação e degradação mais acelerada dos impulsores, sendo aconselhável por isso a reparação/substituição dos impulsores, principalmente nos grupos nº2 e nº4 que apresentaram degradações superiores ao grupo nº1. Este cenário de reparação/substituição dos impulsores permitiu constatar um potencial de redução de custos na ordem dos 18 400 €/ano, tendo em atenção os tempos de funcionamento de 1, 2 ou 3 grupos em operação isolada ou em simultâneo para uma aproximação dos caudais afluentes diários.

Um possível ajuste dos VFD, para o cenário de reparação/substituição dos impulsores atuais foi analisado, onde se concluiu que a operação atual já está otimizada ao nível da Energia Específica e consequentes consumos energéticos, o que é justificado pelo facto de os VFD terem sido instalados na

EE aquando do início de funcionamento desta, tendo na altura sido, possivelmente, feito o mesmo estudo.

A análise à curva característica aproximada do sistema, permitiu concluir um sobredimensionamento acentuado dos grupos elevatórios, perante os valores apontados no projeto de execução, estando assim explicado, a instalação de VFD na presente estação elevatória. Neste sentido foi considerado o cenário de possível diminuição do diâmetro dos impulsores com e sem ajuste dos VFD, no qual foi concluído que na possibilidade de adoção desta solução o recomendado seria os grupos elevatórios passarem a operar nos 47 Hz, onde foi registado o valor mais baixo de Energia Específica. Assim registaram-se poupanças significativas nos custos de energia, na ordem dos 10 000 €/ano, para um tempo de retorno de 2.24 anos sobre o investimento inicial.

A avaliação financeira às soluções estudadas recomenda, que, a optar por alguma das soluções de otimização estudadas, a reparação/substituição dos impulsores atuais seria a estratégia indicada.

Por último a análise à pressão na conduta de aspiração, permitiu afastar a hipótese de situações de cavitação no cenário atual de funcionamento com VFD. No entanto se forem adotadas algumas das soluções de otimização identificadas, esta situação deverá ser cuidadosamente analisada.

6.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo efetuado à Estação Elevatória do Molhe Sul revelou um potencial de otimização considerável. Porém a análise às soluções de otimização apresentou alguns problemas, especialmente por falta de dados relativos aos caudais afluentes diários, o que de certa forma acabou por limitar o trabalho realizado na presente dissertação.

Assim sugere-se, com intuito de uma análise mais detalhada e consistente da presente Estação Elevatória os seguintes trabalhos:

- Levantamento dos caudais afluentes diários, durante os períodos de Verão e Inverno, de forma a poder analisar as reais necessidades de bombeamento do sistema elevatório;
- Exploração de outras soluções de otimização, como por exemplo a instalação de uma bomba de pequena capacidade (Pony Pump), especialmente durante os períodos de menores afluências (Verão);
- Averiguar se reduções de diâmetro diferentes da estudada (Φ 440 mm), conduziriam a benefícios económicos superiores;
- Análise aos níveis de funcionamento do poço de bombagem, evitando assim eventuais problemas de cavitação ou de submersão mínima, particularmente se forem adotadas as estratégias de otimização sugeridas no presente trabalho;
- Avaliação de desempenho ao grupo eletrobomba nº3, o qual não foi possível efetuar, devido à sua inoperação aquando da realização dos testes de eficiência;
- Futuramente na realização de novos testes de eficiência aos grupos elevatórios, efetuar ensaios com fecho progressivo da válvula de seccionamento de jusante, permitindo assim recriar a curva característica real da bomba, o que possibilitaria uma análise mais abrangente, como por exemplo um ajuste na gama de frequência dos VFD para o presente estado dos grupos eletrobomba;

- Estudo de substituição dos grupos eletrobomba atuais por outros mais eficientes e adequados às características reais do sistema elevatório;
- Possível utilização de um software de simulação (PUMP 3E – Pump Energy Efficiency Evaluation), desenvolvido pela Noraqua/H2OPT, que permite uma avaliação diária do sistema elevatório e da sua eficiência energética, bem como uma análise ao potencial de otimização e as principais soluções consideradas, sendo para isso necessário informação relativa aos caudais afluentes, nível de água no poço de bombagem, características dos grupos eletrobomba e as perdas de carga existentes tanto ao nível de estação elevatória como ao longo da conduta elevatória;
- Considerando que os volumes elevados por cada Estação Elevatória, apesar da expectável entrada de caudais intermédios, estão maioritariamente dependentes do caudal elevado pela EE a montante, seria interessante também ser efetuada uma análise conjunta aos sistemas elevatórios em série existentes neste Subsistema de Saneamento, procurando assim implementar medidas de eficiência associadas à interdependência destes.

BIBLIOGRAFIA

- DR N° 23/95 (1995) - Decreto Regulamentar N° 23/95 (23 de Agosto de 1995). Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais.
- ERSAR, (Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos) (2014) - Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal.
- FERNANDES, Marisa Claudia Miranda (2008) - Modelação Hidráulica da Exploração de um Sistema Elevatório de Águas Residuais. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- GRUNDFOS, (2005) - Estações Elevatórias de Águas Residuais. Manual de Engenharia.
- INFOPEDIA, (2015) - Parafusos de Arquimedes. Acedido em 6 de Outubro de 2015
- LEITE, Pedro., VIVAS, Eduardo., MONTEIRO, Paulo., TENTÚGAL VALENTE, Luís. (2010) - Otimização Energética no Dimensionamento de Sistemas Elevatórios de Águas Residuais. 10º Congresso da Água. Disponível em: <http://noraqua.pt/publicacoes.php>
- LEITE, Pedro., VIVAS, Eduardo., MONTEIRO, Paulo., TENTÚGAL VALENTE, Luís. (2011) - Planos de Otimização Energética de Sistemas Elevatórios de Águas Residuais. 14º Encontro Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: <http://noraqua.pt/publicacoes.php>
- LEITE, Pedro., FERREIRA, Fernando., TENTÚGAL VALENTE, Luís., VIVAS, Eduardo. (2012) - Os Variadores de Velocidade como Instrumentos de Otimização Energética em Estações Elevatórias de Águas Residuais. 11º Congresso da Água. Disponível em: <http://noraqua.pt/publicacoes.php>
- LEITE, Pedro., VIVAS, Eduardo., VALENTE, Luís., FERREIRA, Fernando., RÊGO COSTA, José., TEIXEIRA, Miguel. (2014) - Avaliação de Desempenho de Grupos Eletrobomba Através da Realização de Testes de Eficiência. 12º Congresso da Água. Disponível em: <http://noraqua.pt/publicacoes.php>
- LEITE, Pedro., VIVAS, Eduardo., TENTÚGAL VALENTE, Luís., ROCHA, Luís., REIS, Ana., PEREIRA, José. (2015) - Plano de Otimização Energética de Sistemas Elevatórios de Água Residual. Aplicação a um Caso de Estudo de Águas do Centro Litoral. Encontro Nacional de Entidades Gestoras de Água e Saneamento. Disponível em: <http://noraqua.pt/publicacoes.php>
- MONTEIRO, Paulo Santos (2004) - Apontamentos da Disciplina de Sistemas de Drenagem Urbana. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- NOVAIS BARBOSA, J. (1985) - Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral. Porto: Porto Editora
- PATTO, José Vaz (1990) - Estações e Conduitas Elevatórias de Água Residual. Manual do Saneamento Básico (Vol. 2). Ministério do Ambiente e Recursos Naturais - Direção Geral dos Recursos Naturais.
- RIBEIRO, João Tiago de Guimarães (2014) - Sistemas Elevatórios de Águas Residuais em Edifícios. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

TENTÚGAL VALENTE, José (2014) - Apontamentos da Disciplina de Hidráulica Urbana e Ambiental. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

VIVAS, Eduardo., LEITE, Pedro., VALENTE, Luís., TENTÚGAL VALENTE, José., PACHECO FIGUEIREDO, Manuel., AGUILAR, Nuno., FERREIRA, Ricardo. (2014) - Estudos de Otimização Energética em Estações Elevatórias. Uma Metodologia para sua Seleção. 12º Congresso da Água. Disponível em: <http://noraqua.pt/publicacoes.php>

VIVAS, Eduardo., VALENTE, Luís., PEDROSA, Márcio., FELICIANO, Nicole., FONTES, Pedro., LEITE, Pedro. (2016) - Avaliação Funcional e Otimização de Sistemas Elevatórios e Estações de Tratamento de Águas Residuais da Águas de Lisboa e Vale do Tejo, S.A. Apresentação do projeto e avaliação dos primeiros resultados. 13º Congresso da Água.

[1] – <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/59/40/36/594036972ebd602ca1a643232cd36338.jpg> (acedido em 6 de Outubro de 2015)

[2] - <http://mrelectromecanica.blogspot.pt/2010/12/diagnostico-de-fallas-en-bombas.html> (acedido em 7 de Outubro de 2015)

[3] - [http://www.pordata.pt/Europa/Pre%C3%A7os+da+electricidade+para+utilizadores+industriais+e+dom%C3%A9sticos+\(Euro+ECU\)-1477](http://www.pordata.pt/Europa/Pre%C3%A7os+da+electricidade+para+utilizadores+industriais+e+dom%C3%A9sticos+(Euro+ECU)-1477) (acedido em 15 de Novembro de 2015)

[4] - <http://www.adnorte.pt/pt/aguas-do-norte/quem-somos/?id=5> (acedido em 11 de Dezembro de 2015)

ANEXOS

ANEXO A – CAUDAIS BOMBADOS (ANO 2014)

Caudalímetro		
Data / Hora	Contagem/Acumulado (m³)	Caudal bombado diário (m³/dia)
2014/jan/01 09:18	15365518	23284
2014/jan/02 09:58	15388802	25035
2014/jan/03 09:00	15413837	18388
2014/jan/04 13:13	15432225	21040
2014/jan/05 09:05	15453265	18625
2014/jan/06 09:20	15471890	24643
2014/jan/07 10:58	15496533	17032
2014/jan/08 09:45	15513565	11985
2014/jan/09 09:08	15525550	11621
2014/jan/10 09:03	15537171	11219
2014/jan/11 09:02	15548390	8974
2014/jan/12 09:12	15557364	10972
2014/jan/13 13:37	15568336	15950
2014/jan/14 08:10	15584286	10904
2014/jan/15 15:34	15595190	16557
2014/jan/16 15:42	15611747	21210
2014/jan/17 12:10	15632957	15749
2014/jan/18 12:35	15648706	0
2014/jan/19 07:01	15648706	14533
2014/jan/19 15:34	15663239	0
2014/jan/19 15:45	15663239	0
2014/jan/19 15:52	15663239	0
2014/jan/19 15:56	15663239	10641
2014/jan/20 07:01	15673880	0
2014/jan/21 12:39	15673880	0
2014/jan/21 12:53	15673880	30834
2014/jan/22 08:00	15704714	0
2014/jan/23 15:58	15704714	24697
2014/jan/24 07:01	15729411	11741
2014/jan/25 07:01	15741152	9938
2014/jan/26 07:01	15751090	10120
2014/jan/27 07:01	15761210	12704
2014/jan/28 08:01	15773914	18331
2014/jan/29 07:01	15792245	11769
2014/jan/30 07:01	15804014	0
2014/jan/31 07:01	15804014	30840
2014/fev/01 07:01	15834854	12118
2014/fev/02 19:46	15846972	0

2014/fev/02 20:10	15846972	13882
2014/fev/03 18:40	15860854	16001
2014/fev/04 07:01	15876855	0
2014/fev/05 07:01	15876855	34978
2014/fev/06 07:01	15911833	15996
2014/fev/07 15:49	15927829	17408
2014/fev/08 07:01	15945237	16368
2014/fev/09 13:33	15961605	19572
2014/fev/10 12:45	15981177	16509
2014/fev/11 07:01	15997686	16850
2014/fev/12 07:01	16014536	17075
2014/fev/13 07:01	16031611	12376
2014/fev/14 16:23	16043987	23107
2014/fev/15 07:01	16067094	15271
2014/fev/16 07:01	16082365	15133
2014/fev/17 07:01	16097498	16086
2014/fev/18 07:01	16113584	13260
2014/fev/19 07:01	16126844	12834
2014/fev/20 15:02	16139678	13756
2014/fev/21 08:01	16153434	12900
2014/fev/22 07:01	16166334	10385
2014/fev/23 07:01	16176719	16815
2014/fev/24 15:03	16193534	13259
2014/fev/25 16:01	16206793	14678
2014/fev/26 15:55	16221471	13909
2014/fev/27 07:01	16235380	13749
2014/fev/28 16:00	16249129	16425
2014/mar/01 07:01	16265554	14669
2014/mar/02 07:01	16280223	13909
2014/mar/03 07:01	16294132	14191
2014/mar/04 07:01	16308323	16390
2014/mar/05 07:01	16324713	12786
2014/mar/06 07:01	16337499	11523
2014/mar/07 07:01	16349022	10945
2014/mar/08 07:01	16359967	9802
2014/mar/09 07:01	16369769	11936
2014/mar/10 07:01	16381705	10910
2014/mar/11 07:01	16392615	10396
2014/mar/12 07:01	16403011	8506
2014/mar/13 07:01	16411517	9746
2014/mar/14 07:01	16421263	9699
2014/mar/15 07:01	16430962	9605
2014/mar/16 07:01	16440567	10287

2014/mar/17 07:01	16450854	10085
2014/mar/18 15:33	16460939	10217
2014/mar/19 07:01	16471156	10832
2014/mar/20 07:01	16481988	9431
2014/mar/21 15:02	16491419	10913
2014/mar/22 15:27	16502332	8817
2014/mar/23 15:14	16511149	11928
2014/mar/24 07:01	16523077	11883
2014/mar/25 19:11	16534960	10199
2014/mar/26 07:01	16545159	10840
2014/mar/27 09:26	16555999	9051
2014/mar/28 09:21	16565050	11030
2014/mar/29 09:24	16576080	10034
2014/mar/30 07:52	16586114	17015
2014/mar/31 08:32	16603129	14698
2014/abr/01 08:07	16617827	15908
2014/abr/02 08:03	16633735	12627
2014/abr/03 08:31	16646362	11958
2014/abr/04 09:05	16658320	19625
2014/abr/05 07:55	16677945	9755
2014/abr/06 08:51	16687700	12009
2014/abr/07 08:57	16699709	10473
2014/abr/08 08:57	16710182	12299
2014/abr/09 09:11	16722481	10757
2014/abr/10 09:10	16733238	13162
2014/abr/11 14:47	16746400	7517
2014/abr/12 08:12	16753917	9855
2014/abr/13 08:20	16763772	11217
2014/abr/14 09:28	16774989	9815
2014/abr/15 08:12	16784804	9692
2014/abr/16 08:03	16794496	10520
2014/abr/17 08:50	16805016	9943
2014/abr/18 08:12	16814959	9043
2014/abr/19 09:02	16824002	8876
2014/abr/20 08:47	16832878	7737
2014/abr/21 07:50	16840615	7806
2014/abr/22 07:46	16848421	11672
2014/abr/23 09:08	16860093	13210
2014/abr/24 09:37	16873303	10636
2014/abr/25 09:21	16883939	14673
2014/abr/26 07:46	16898612	11261
2014/abr/27 08:49	16909873	10455
2014/abr/28 07:55	16920328	12796

2014/abr/29 11:07	16933124	8618
2014/abr/30 09:22	16941742	8391
2014/mai/01 09:15	16950133	11099
2014/mai/02 08:04	16961232	8836
2014/mai/03 09:21	16970068	10040
2014/mai/04 08:17	16980108	9553
2014/mai/05 09:08	16989661	9999
2014/mai/06 08:44	16999660	9637
2014/mai/07 08:05	17009297	10052
2014/mai/08 08:04	17019349	9250
2014/mai/09 07:59	17028599	9782
2014/mai/10 09:31	17038381	9905
2014/mai/11 08:20	17048286	8927
2014/mai/12 08:05	17057213	10251
2014/mai/13 08:23	17067464	9606
2014/mai/14 08:05	17077070	9179
2014/mai/15 07:56	17086249	9835
2014/mai/16 08:04	17096084	9209
2014/mai/17 07:48	17105293	10734
2014/mai/18 15:39	17116027	9805
2014/mai/19 13:34	17125832	13270
2014/mai/20 09:17	17139102	15645
2014/mai/21 09:36	17154747	16195
2014/mai/22 09:05	17170942	12579
2014/mai/23 07:59	17183521	10437
2014/mai/24 08:58	17193958	11003
2014/mai/25 07:53	17204961	9945
2014/mai/26 09:50	17214906	8670
2014/mai/27 08:08	17223576	12368
2014/mai/28 08:17	17235944	11507
2014/mai/29 08:00	17247451	11518
2014/mai/30 08:12	17258969	5821
2014/mai/31 08:48	17264790	13841
2014/jun/01 08:39	17278631	13626
2014/jun/02 07:55	17292257	13249
2014/jun/03 08:56	17305506	14028
2014/jun/04 09:27	17319534	11644
2014/jun/05 07:59	17331178	13881
2014/jun/06 08:03	17345059	20551
2014/jun/07 08:01	17365610	15210
2014/jun/08 08:55	17380820	15656
2014/jun/09 08:21	17396476	13552
2014/jun/10 08:52	17410028	12965

2014/jun/11 07:54	17422993	15723
2014/jun/12 08:17	17438716	13785
2014/jun/13 07:55	17452501	14327
2014/jun/14 09:12	17466828	15043
2014/jun/15 09:00	17481871	14535
2014/jun/16 10:15	17496406	12314
2014/jun/17 09:00	17508720	12927
2014/jun/18 07:50	17521647	12751
2014/jun/19 07:56	17534398	12457
2014/jun/20 07:53	17546855	12945
2014/jun/21 08:03	17559800	13427
2014/jun/22 09:20	17573227	12075
2014/jun/23 07:51	17585302	12901
2014/jun/24 09:01	17598203	15712
2014/jun/25 08:15	17613915	12197
2014/jun/26 08:52	17626112	13339
2014/jun/27 08:56	17639451	18120
2014/jun/28 08:26	17657571	17602
2014/jun/29 08:32	17675173	13728
2014/jun/30 11:10	17688901	21281
2014/jul/01 13:39	17710182	11181
2014/jul/02 07:59	17721363	13788
2014/jul/03 07:58	17735151	13624
2014/jul/04 08:04	17748775	13173
2014/jul/05 07:54	17761948	20202
2014/jul/06 09:01	17782150	16835
2014/jul/07 10:01	17798985	13370
2014/jul/08 09:06	17812355	13604
2014/jul/09 08:00	17825959	13926
2014/jul/10 08:14	17839885	13783
2014/jul/11 08:39	17853668	13335
2014/jul/12 08:58	17867003	14270
2014/jul/13 07:55	17881273	13163
2014/jul/14 08:59	17894436	13450
2014/jul/15 09:01	17907886	13101
2014/jul/16 09:09	17920987	12617
2014/jul/17 09:04	17933604	12586
2014/jul/18 08:07	17946190	16327
2014/jul/19 08:59	17962517	19777
2014/jul/20 09:04	17982294	13884
2014/jul/21 09:33	17996178	27747
2014/jul/23 09:45	18023925	13107
2014/jul/24 08:03	18037032	13535

2014/jul/25 08:56	18050567	14115
2014/jul/26 09:01	18064682	14395
2014/jul/27 09:04	18079077	13294
2014/jul/28 08:07	18092371	13706
2014/jul/29 09:00	18106077	14638
2014/jul/30 09:24	18120715	12816
2014/jul/31 07:54	18133531	13306
2014/ago/01 09:19	18146837	14785
2014/ago/02 09:04	18161622	14880
2014/ago/03 09:07	18176502	16621
2014/ago/04 09:12	18193123	13232
2014/ago/05 09:04	18206355	14467
2014/ago/06 09:25	18220822	14602
2014/ago/07 09:50	18235424	14138
2014/ago/08 09:13	18249562	15179
2014/ago/09 08:59	18264741	15248
2014/ago/10 09:19	18279989	14167
2014/ago/11 09:20	18294156	14842
2014/ago/12 09:03	18308998	16311
2014/ago/13 09:07	18325309	16880
2014/ago/14 11:03	18342189	13583
2014/ago/15 08:40	18355772	14042
2014/ago/16 09:03	18369814	14721
2014/ago/17 09:11	18384535	13141
2014/ago/18 07:37	18397676	15431
2014/ago/19 09:39	18413107	13269
2014/ago/20 09:31	18426376	13969
2014/ago/21 07:01	18440345	14097
2014/ago/22 07:53	18454442	14610
2014/ago/23 08:04	18469052	14329
2014/ago/24 08:14	18483381	12935
2014/ago/25 08:01	18496316	9701
2014/ago/26 11:14	18506017	17993
2014/ago/27 08:26	18524010	14962
2014/ago/28 10:03	18538972	13231
2014/ago/29 09:13	18552203	14003
2014/ago/30 08:30	18566206	13749
2014/ago/31 09:17	18579955	13290
2014/set/01 10:58	18593245	11860
2014/set/02 09:10	18605105	11878
2014/set/03 10:04	18616983	11816
2014/set/04 09:49	18628799	11898
2014/set/05 08:31	18640697	12477

2014/set/06 09:25	18653174	18037
2014/set/07 12:10	18671211	13456
2014/set/08 09:09	18684667	13176
2014/set/09 08:33	18697843	14028
2014/set/10 08:01	18711871	14081
2014/set/11 09:17	18725952	13117
2014/set/12 10:18	18739069	10871
2014/set/13 09:27	18749940	11492
2014/set/14 08:50	18761432	17108
2014/set/15 10:06	18778540	13879
2014/set/16 09:27	18792419	20046
2014/set/17 10:09	18812465	16018
2014/set/18 09:00	18828483	26891
2014/set/19 08:24	18855374	12884
2014/set/20 09:03	18868258	14969
2014/set/21 09:03	18883227	11736
2014/set/22 08:21	18894963	12715
2014/set/23 09:03	18907678	13992
2014/set/24 09:12	18921670	12944
2014/set/25 08:53	18934614	12306
2014/set/26 08:43	18946920	13255
2014/set/27 08:00	18960175	13801
2014/set/28 08:00	18973976	13801
2014/set/28 15:24	18960175	26515
2014/set/29 13:23	18986690	12252
2014/set/30 09:23	18998942	11431
2014/out/01 10:07	19010373	9690
2014/out/02 09:05	19020063	11544
2014/out/03 11:02	19031607	9030
2014/out/04 09:40	19040637	8796
2014/out/05 09:28	19049433	8973
2014/out/06 09:31	19058406	10206
2014/out/07 08:28	19068612	11138
2014/out/08 08:23	19079750	15953
2014/out/09 10:28	19095703	12323
2014/out/10 10:16	19108026	10666
2014/out/11 08:37	19118692	11554
2014/out/12 08:20	19130246	11226
2014/out/13 10:39	19141472	17037
2014/out/14 09:30	19158509	14893
2014/out/15 10:06	19173402	19107
2014/out/16 09:03	19192509	17561
2014/out/17 08:16	19210070	14512

2014/out/18 08:54	19224582	11967
2014/out/19 08:58	19236549	14601
2014/out/20 08:56	19251150	13254
2014/out/21 09:24	19264404	11885
2014/out/22 08:23	19276289	11729
2014/out/23 09:49	19288018	10704
2014/out/24 09:13	19298722	10837
2014/out/25 08:58	19309559	10499
2014/out/26 08:54	19320058	10442
2014/out/27 09:25	19330500	11185
2014/out/28 09:54	19341685	9941
2014/out/29 09:14	19351626	9593
2014/out/30 09:09	19361219	9106
2014/out/31 09:01	19370325	10870
2014/nov/01 08:45	19381195	8998
2014/nov/02 08:45	19390193	12306
2014/nov/03 09:09	19402499	17211
2014/nov/04 08:47	19419710	15555
2014/nov/05 09:14	19435265	10911
2014/nov/06 09:12	19446176	14289
2014/nov/07 09:19	19460465	18408
2014/nov/08 09:02	19478873	2961
2014/nov/09 08:57	19481834	15402
2014/nov/10 09:40	19497236	14869
2014/nov/11 09:06	19512105	15483
2014/nov/12 09:16	19527588	14920
2014/nov/13 08:51	19542508	14148
2014/nov/14 08:51	19556656	15725
2014/nov/15 10:04	19572381	11358
2014/nov/16 08:59	19583739	9819
2014/nov/17 09:03	19593558	15153
2014/nov/18 09:50	19608711	16056
2014/nov/19 09:13	19624767	12775
2014/nov/20 09:07	19637542	11567
2014/nov/21 09:06	19649109	10006
2014/nov/22 10:24	19659115	10243
2014/nov/23 09:39	19669358	8100
2014/nov/24 08:56	19677458	11087
2014/nov/25 09:51	19688545	10331
2014/nov/26 08:58	19698876	10666
2014/nov/27 08:59	19709542	13498
2014/nov/28 09:20	19723040	11603
2014/nov/29 08:41	19734643	8790

2014/nov/30 09:02	19743433	7420
2014/dez/01 09:10	19750853	9192
2014/dez/02 10:04	19760045	9560
2014/dez/03 09:12	19769605	9668
2014/dez/04 09:11	19779273	9472
2014/dez/05 09:07	19788745	9630
2014/dez/06 09:04	19798375	8646
2014/dez/07 09:05	19807021	8912
2014/dez/08 09:14	19815933	11913
2014/dez/09 11:52	19827846	8247
2014/dez/10 10:14	19836093	8117
2014/dez/11 09:06	19844210	9090
2014/dez/12 09:10	19853300	17495
2014/dez/13 09:01	19870795	11428
2014/dez/14 09:14	19882223	10774
2014/dez/15 09:26	19892997	10908
2014/dez/16 09:50	19903905	4130
2014/dez/17 09:01	19908035	11322
2014/dez/18 09:08	19919357	9952
2014/dez/19 08:59	19929309	10163
2014/dez/20 08:46	19939472	9794
2014/dez/21 08:47	19949266	9956
2014/dez/22 09:06	19959222	10201
2014/dez/23 09:00	19969423	10486
2014/dez/24 10:41	19979909	8543
2014/dez/25 09:06	19988452	9718
2014/dez/26 09:21	19998170	9461
2014/dez/27 08:59	20007631	10344
2014/dez/28 08:49	20017975	9296
2014/dez/29 09:15	20027271	9931
2014/dez/30 09:21	20037202	9572
2014/dez/31 09:45	20046774	9757